

国际信息工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

认知视角下的无线传感器网络

Wireless Sensor Networks: A Cognitive Perspective

（美） Mohamed Ibnkahla 编著

郎为民 张锋军 余亮琴 陈 凯 等译





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

认知视角下的无线传感器网络

（美）Mohamed Ibnkahla 编著
郎为民 张锋军 余亮琴 陈 凯 等译



机 械 工 业 出 版 社

Wireless Sensor Networks: A Cognitive Perspective/by Mohamed Ibnkahla/ISBN: 978-1-4398-5277-4

图书在版编目（CIP）数据

认知视角下的无线传感器网络/（美）因卡拉（Ibnkahla, M.）编著；郎为民等译.—北京：机械工业出版社，2014.10

（国际信息工程先进技术译丛）

书名原文：Wireless sensor networks: a cognitive perspective

ISBN 978-7-111-47637-5

Ⅰ.①认… Ⅱ.①因…②郎… Ⅲ.①无线电通信-传感器 Ⅳ.①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 183914 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：张俊红　责任编辑：吕　潇

版式设计：霍永明　责任校对：张　征

责任印制：刘　岚

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm・13 印张・281 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-47637-5

定价：59.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**

本书主要从认知角度对无线传感器进行分析，紧紧围绕无线传感器网络中认知功能实现中的问题，比较全面和系统地介绍了无线传感器网络的基础知识、各种协议的性能比较和无线传感器认知功能硬件实现的最新成果。全书共分为7章，涉及认知无线电网络和动态频谱接入、自适应调制、自适应功率分配、自适应媒介访问、无线多跳路由跨层设计、认知分集路由协议、基于加权认知图的认知功能，以及基于GPS/INS无线传感器网络的硬件结构等内容。本书材料权威丰富，体系结构完整，内容新颖翔实，知识系统全面，图表丰富，行文通俗易懂，兼备知识性、系统性、可读性、实用性和指导性。

本书可作为移动运营商、网络运营商、应用开发人员、技术经理和电信管理人员的技术参考书或培训教材，也可作为高等院校通信与信息系统专业的本科生、研究生教材。

译 者 序

微电子、计算和无线通信等技术的进步，推动了低功耗、多功能传感器的快速发展，使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能，从而孕育出无线传感器网络（Wireless Sensor Networks，WSN），并以其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点带来了信息感知的一场变革。无线传感器网络就是由部署在监测区域内大量廉价微型传感器节点组成，通过无线通信方式形成一个多跳自组织网络。目前，已被广泛应用于智能住宅、智能交通、医疗保健、公共卫生、军事、食品安全、水质监测、智能电网等诸多领域。

然而，随着用户对无线传感器网络的覆盖率、连通性、安全性、能量效率以及网络设备小型化、低成本等要求的提高，传统技术在满足用户的这些需求方面已经达到极限，而在无线传感器中应用认知功能则有可能满足用户更高的需求。

在这种背景下，为促进我国认知功能在无线传感器网络中的实现和应用，在国家自然科学基金项目“节能无线认知传感器网络协同频谱感知安全研究”（编号:61100240）和国防信息学院预先研究项目资金的支持下，结合自己多年来在移动通信技术领域的研究成果和经验，笔者特翻译此外文原著，以期抛砖引玉，为我国无线传感器网络的发展尽一份微薄之力。

本书紧紧围绕无线传感器网络中认知功能的实现，主要对无线传感器网络的基础知识、各种协议的性能比较和无线传感器认知功能硬件实现等进行了介绍，共分为7章，涉及认知无线电网络和动态频谱接入、自适应调制、自适应功率分配、自适应媒介访问、无线多跳路由跨层设计、认知分集路由协议、基于加权认知图的认知功能以及基于GPS/INS无线传感器网络的硬件结构等内容。

本书主要由郎为民、张锋军、余亮琴、陈凯翻译，解放军国防信息学院的刘建国、苏泽友、钟京立、刘勇、张国峰、陈红、夏白桦、毛炳文、刘素清、邹祥福、瞿连政、徐延军、陈于平、张丽红、王大鹏、王昊、陈虎参与了本书部分章节的翻译工作，和湘、朱元诚、高泳洪、周莉、蔡理金、王会涛绘制了本书的全部图表，李建军、靳焰、王逢东、孙月光、孙少兰、马同兵对本书的初稿进行了审校，并更正了不少错误，在此一并向他们表示衷心的感谢。同时，本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译而成的，书中的意见和观点并不代表译者本人及所在单位的意见和观点。

由于无线传感器网络技术还在不断完善和深化发展之中，加之译者水平有限，翻译时间仓促，因而本书翻译中的错漏之处在所难免，恳请各位专家和读者不吝指出。

郎为民

2014年10月于江城武汉

原书前言

无线传感器网络正在日益得到普及应用，现在已被广泛应用于诸如智能住宅及建筑物、智能交通、医疗保健、公共卫生、军事、食品安全、水质监测、智能电网、工业过程控制、精准农业、安全、环境等关键领域以及类似的应用领域。不同速率要求的各种类型的数据都可以通过这些网络进行传输。然而，由于用户总是需要更好的覆盖率、连通性、安全性和能源效率，同时也在寻找小型化、低成本的自主设备，在这一领域的经典技术将很快达到极限，而无法满足用户的需求。

认知通信是一个几年前出现的新概念，其重要性已经得到证实，尤其是在认知无线电领域。如今这一概念已被推广到包括无线通信系统设计的各个方面。

无线传感器网络是一个能很容易开发利用认知和智能的优秀领域，而这不仅有利于提高网络的效率，满足用户需求，同时也会创造出新的需求和应用领域。这是因为无线传感器网络本身的分布式系统能够使部署区域内的一切信息变得简易可得。这些信息包括用户的需求、用户要求、环境条件、网络条件、节点级别的信息（如电池电量、传输范围、处理能力和位置信息）等。安全也是一个重要的问题，而认知概念可以在其中发挥关键的作用。

在过去的几年中，电信领域的认知研究已经散见于大量的会议和期刊论文。本书介绍了这一领域的研究现状，并提出了一个不同于以往的认知方式和方法的统一的视图。本书将是认知通信基础理论的一个标杆，并将为这一领域的研究开启一个新的时代。

本书结构

第 1 章介绍了基本的认知概念，回顾了该领域的不同研究方法，并提出了无线传感器网络的一个通用的认知架构。

第 2 ~5 章针对需要通过认知加以解决的特定问题，从认知无线电和频谱接入（第 2 章）开始研究至路由协议（第 5 章）。第 2 章讨论物理层面的认知无线电和使用多输入/多输出系统和协同分集技术的动态频谱接入。第 3 章讨论物理层（自适应调制和功率分配）和媒体访问层（自适应睡眠）的联合适应性。第 4 章讨论跨层设计的性能（可以被看做认知领域的一个非常基本的组成），解决多跳网络中的路由服务质量问题。介绍了除无线传感器网络之外的一系列多跳网络。这样安排是为了使读者能够了解每种网络类型的不同要求，以及如何通过跨层设计满足这些不同需求。第 5 章介绍了一个典型的被称为认知多样性路由的认知路由协议。认知属性通过一些环境参数来表现，如信道状态和功率水平，以及用户/应用偏好。

在读者已经对无线传感器网络了解了上述特定的认知功能（第 2 ~5 章）之后，第 6 章涉及更普遍的包含有大量参数、需求、实用措施以及端对端目标的认知概念。本章使用加权认知图的概念，通过路由优化、媒体访问和功率控制来提高网络的生命周期，

同时实现端对端的目标。第6章中提出的方法和概念都很笼统，可能包含与协议栈的所有层有关的大量参数和对象。

第7章最初计划讨论全面的认知架构的硬件实现。然而，在认知无线传感器网络领域的硬件实现还不成熟。因此，转而讨论实施GPS/ INS启用无线传感器网络的重要问题。许多无线传感器网络应用和通信协议需要实时的节点位置信息。一些认知研究需要节点位置信息以确保其在现实应用中的可实现性。第7章介绍了配备有实时定位设备的无线传感器网络硬件实现的关键步骤，确保其即使在GPS服务中断期间仍然可以正常工作。

必备知识背景

阅读本书之前，电信领域的一般知识是必备的（如基本的数字通信本科的课程），附加无线通信的基本知识，但后者不是必需的。

本书经过精心设计以便无线通信领域的专家可以独立地理解相关章节。尽管如此，本书提供了全面和深入地了解这一领域的知识内容，希望非专业人士能够按顺序阅读这些章节。

致谢

E. Bdira博士、A. Noureldin博士为相关章节的撰写和仿真/实验做出了贡献：博士研究生G. Vijay（第1章）、博士研究生A. Abu Alkheir（第2章）、硕士研究生X. Zhao（第3章）、博士研究生A. ElMougy（第4章和第6章）、硕士研究生Z. El－Jabi（第5章）、硕士研究生C. Tang（第7章）、E. Bdira博士（第3章和第5章）、A. Noureldin博士（第7章）。我真的很感激他们所有人。

我想感谢所有的在过去10年支持我从事研究的机构和公司，包括加拿大NSERC（Natural Sciences and Engineering Research Council，自然科学和工程研究理事会）、安大略省卓越中心、安大略省自然资源部、ORF（Ontario Research Fund，安大略省研究基金）Wisense项目、Lunaris公司、ElectroMagneticWorks公司、加拿大IBM公司和NSERC DIVA网络。

本书特点

- 这本书是本领域同类书中的首创，涵盖了所有的协议栈层。
- 包含250多个参考文献，每一章节都有独立的参考文献。
- 包含130多张图片和近20个表格。
- 介绍性章节涵盖了在这一领域的研究现状。
- 每章开始都对相应主题的研究现状进行了深入的调查研究。
- 所有章节都以教程的形式撰写，易于理解。
- 对不同的算法和协议进行了深入描述。
- 提供了大量的计算机仿真和插图，对不同系统进行了逐步的分析研究。

目　　录

第1章　无线传感器网络的认知研究导论

1.1　概述

WSN（Wireless Sensor Networks，无线传感器网络）由大量尺寸小、重量轻、功耗低的节点构成，被用于各种各样的应用领域中，如环境监测、卫生保健、精准农业、安全、食品安全、水质监测、智能交通、智能电网通信等。低功耗、VLSI（Very - Large - Scale Integration，超大规模集成）和嵌入式系统领域的技术进步，以及通信和计算机技术的融合，促成了传感、处理和通信设备的小型化。这导致传感器网络的应用领域不断扩展。现在，研究人员认为，WSN 将成为环境智能的关键技术，在这一领域，这些微小的传感装置将使网络终端用户要求的实时环境感知、个性化服务和自适应计算成为可能。然而，传感器网络通信也面临着有限的可用能源的挑战。多样性的、经常相互冲突的优化目标实现也一直是一个挑战，因为受限制的协议栈层间的相互作用使得它很难在满足网络元素多样性目标的同时实现网络整体化的最终目标。

为了解决这些问题，提出了跨层设计方法。这种设计模式允许层之间的信息共享，也使得不同层的联合优化问题得以解决。但是，涵盖所有层的信息，将导致模块化程度降低和自适应环路增加，使系统处理起来更加复杂。研究界已经认识到这些局限性，正在研究更全面的方法。

为了使传感器网络成为普及的计算环境的一部分，它们需要变得主动而非被动，必须具备感知环境变化、从对象过去的行为推断当前的最佳反应以及基于应用的最佳需求预测其未来行为的能力。换句话说，我们所谈论的是在传感器网络中引入认知行为。

认知是指能感知环境，从过去的行动中学习，并利用这些信息做出能够使网络受益的未来决策的能力。与智能只注重决策机制不同，认知注重于从环境中获取信息[1]。因此，学习能力成为区分认知网络和非认知网络的关键[2]。为了说明在无线网络中引入认知的思想，研究一下图 1.1 中的例子。S_1 和 S_2 是试图将数据路由到目的节点 D_1 和 D_2 的源节点。在缺乏可用的中继节点的情况下，确定节点 R_5 在通往 D_1 和 D_2 时具有最低的链路中断概率。因此，S_1 开始通过 R_5 发送数据，同时，S_2 也开始通过 R_5（以实线路径表示）发送一个高流量的数据。当多个源节点开始通过该节点路由数据时，通过 R_5 的路由就可能会拥挤。但是有学习能力的认知网络，举例来说，通过观察源节点吞吐量的减少，将能够确定和预测到 R_5 的拥塞。通过与网络中的所有节点共享这一观察的结论，认知网络能够应对拥堵，主动地将数据通过不同的路径节点 R_4、R_8 和 R_9 进行路由，如图 1.1b 所示。这有利于保护类似于 R_5 的节点，从而维持网络的连接，并提供可靠的数据传输，而这是在传感器网络应用中特别重要的。基于上述应用，网络要进行选

择，例如，可能在跳数最小化（通过选择路线 $S_1 \rightarrow R_4 \rightarrow D_1$）和不论跳数而功耗最低（通过选择路线 $S_1 \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow D_1$）之间做出选择。因此，可以看到，在无线网络中引入认知是有利的。现在，继续了解在 WSN 中引入认知的目标。

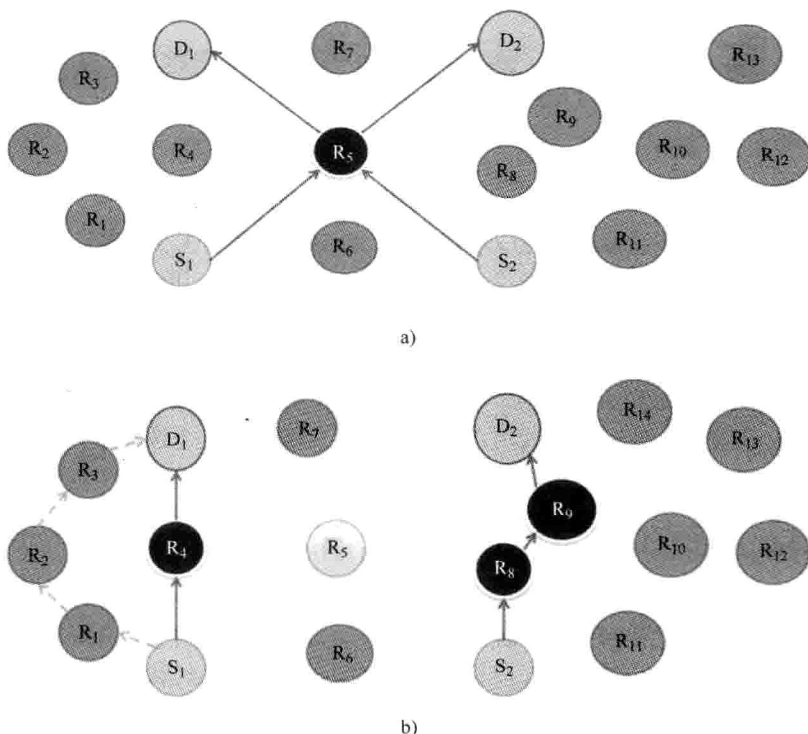


图 1.1 传感器网络中的传统路由和认知路由

a）传感器网络中的经典路由 b）响应拥塞的认知路由

以下几点总结了引入认知的传感器网络的目标：

1）使网络能够感知并动态适应应用需求和自身环境。

2）提供一个全面的方法，使传感器网络能实现端对端的网络目标，即收集物理层的信道条件信息、网络层和 MAC 的网络状态信息以及应用层的应用需求信息，然后运用关于过去行动及其结果的记忆做出合理的决策，并对网络中的多目标进行优化。

3）能够在周围智能环境中使用传感器网络。

收集协议栈所有层的信息，将使得传感器网络能获得网络变化的整体视图：应用需求的变化、物理层信道状态的变化或者网络节点连接状态的变化。下面看看什么样的信息是期望被收集到的。

1.1.1 应用层需求

在传感器网络中，终端用户的需求可能会随着时间的推移或在某特定时间段内发生

变化，即使部署的网络是针对某一个特定的应用。例如，在环境监测应用中，覆盖范围、连通性和对服务中断的高容忍度是影响网络生命周期的重要方面。这里，传感器网络部署的正常功能是事件监测。因此，连通性和覆盖标准在确保网络生命周期最大化方面起着重要作用。经过一段时间后，一些节点可能不能工作了，这将导致数据冗余减少的情形。从源节点到目标节点的可靠的数据传输需求增加了。因此，除了覆盖率和连通性之外，增加了可靠性指标。此外，如果某些节点部署有相机，当终端用户希望在一些选定的节点开启相机模块时，就可能有增加带宽的需求。

在智能电网监控应用中，覆盖率、连通性、实时处理、双向通信和安全是很重要的需求。这些需求也可能会随时间而改变。例如，PV（Photovoltaic，光伏）面板的数据传输在夜间是不需要的。然而，在白天，它所产生的功率和所存储的功率需要准实时地传播到控制中心。一个类似的例子是电动汽车的电池水平信息不需要每时每刻发送。然而，当电动汽车要求电池充电时，其电池水平信息就要被发送到网络控制中心。在充电过程中，电池水平信息也需要被发送。对于智能电网，数据安全性的要求会随着节点部署和各自角色的不同而有所变化。

上述情况说明，传感器网络的特定应用部署的应用/终端用户的需求会随时间而改变。因此，应用需求是网络中端对端数据流的代表。应用需求应该是认知传感器网络决策过程及其优化首先要考虑的。

1.1.2　物理层的约束和需求

物理信道的条件，如路径损耗、SINR（Signal - to - Interference plus Noise Ratio，信号与干扰加噪声比）、由节点电池的剩余电量决定的发送功率的限制和数据速率，约束着物理层且在决定是否满足或降低应用需求方面发挥作用。因此，在认知决策和实现端对端的网络目标时要充分考虑 PHY（Physical Layer，物理层）的要求和约束。

1.1.3　网络状态传感器

MAC（Medium Access Control，媒体访问控制）层和 NWK（Network Layer，网络层）共同提供了有关网络状态的信息。网络层管理着路由方案、连通性和网络节点（路由器/簇头）的作用，MAC 处理节点关联/非关联、信道准入控制、启用/禁用无线电和信标管理。安全性由两个层共同处理。从 NWK 和 MAC 获得的所有信息将对认知决策非常有用。例如，当有关于网络层的路由方案信息、PHY 的信道状态信息和应用层的需求信息时，认知网络可能会发现，在现有的 PHY 条件下，当前的路由方案无法满足终端用户的需求。因此，它可能决定指示网络层采取不同的路由方案，因为目前的方案无法实现端对端的网络目标。

为了实现这些目标，学习网络状态、记忆过去的行为、预测未来的网络条件并做出认知决策应该是系统设计的核心部件。

本章的后续章节组织如下：第 1.2 节展示认知网络和认知无线传感器网络领域的相关工作，第 1.3 节介绍一个通用的认知网络架构的例子，第 1.4 节是结论。

1.2 相关工作

物理层的 CR（Cognitive Radio，认知无线电）技术[8]是第 2 章的主题。这些技术可用于传感器网络和其他网络中。本书中包括 CR 的原因是它代表一种与频谱可用性和利用率相关的、先进和完善的物理层感知功能。

通常认为传感器网络协议栈的分层体系结构阻碍了网络满足多个优化目标的能力。虽然跨层设计已经普及，但其影响仍限于几层。全网的性能目标仍然没有考虑。对于一个给定的输入，它能够针对先前结果提供反应式、无记忆适配功能。跨层的相互作用带来了体系结构模块化设计的减少，这反过来又导致了不稳定性的增加和网络维护的高成本。第 4 章是跨层设计研究的概述，比较了各种跨层方法，并强调了各自的优点和缺点。

需要一种新的方法来克服现有设计技术的局限性。这种技术可能是革命性的，完全不同于现有的技术，或者它可能是一个渐进的、建立在现有的日趋成熟的技术之上的技术。

我们探索 Clark 等提出的想法[3]，他们提出了有线网络 KP（knowledge plane，知识平面）的概念。KP 是一个不同于现有的协议栈的数据和控制平面的结构。

在下面的章节中，探讨 KP 的细节和它的功能以及这一概念如何被引入到无线世界中，也注意到在认识 CSN（Cognitive Sensor Network，认知传感器网络）的过程中所采用的各种技术。

1.2.1 知识平面和认知网络

Clark 等提出的知识平面（KP）的概念[3]努力要克服跨层设计方法的局限性和漏洞。其目的是要打破壁垒的层状结构并在所有层之间实现无缝通信，如图 1.2 所示。KP 是一个基于知识而不是任务的普及系统，因此，在动态环境中从网络的不同部分观察到的不完整、不一致、甚至相互矛盾的信息，KP 都可以对其存在的相关性做出判断。根据作者在参考文献[3]中的描述，KP 能够对存在的部分或相互矛盾的信息做出决定，进行自动决策，应对紧急情况，甚至预见到问题并积极采取纠正措施。他们的想法是建立一个在给予高级别指令时能够自行重组的网络，能够适应变化，需要时重新组合，及时发现问题和解决问题，或解释为什么问题不能被解决。推理能够支持网络的高层次目标和约束，调解用户或运营商之间相互冲突的目标和设计约束。整个网络的端对端的目标在优化过程中都是谨记于心的，而不像跨层设计方法中只注重那几个交互层。这就要求系统具备获知网络及其行动的能力和基于过去的经验做出决定的学习机制。因此，AI（Artificial Intelligence，人工智能）和认知技术的代表性工具，即学习能力和推理能力，而不是传统的算法，被认为最适合实现 KP 的复杂目标。

图 1.2 所示是一个实现 IEEE 802.15.4/ZigBee 栈的知识平面（KP）的例子。这一概念的强大功能在于信息通过 KP 可以在所有层中实现共享。

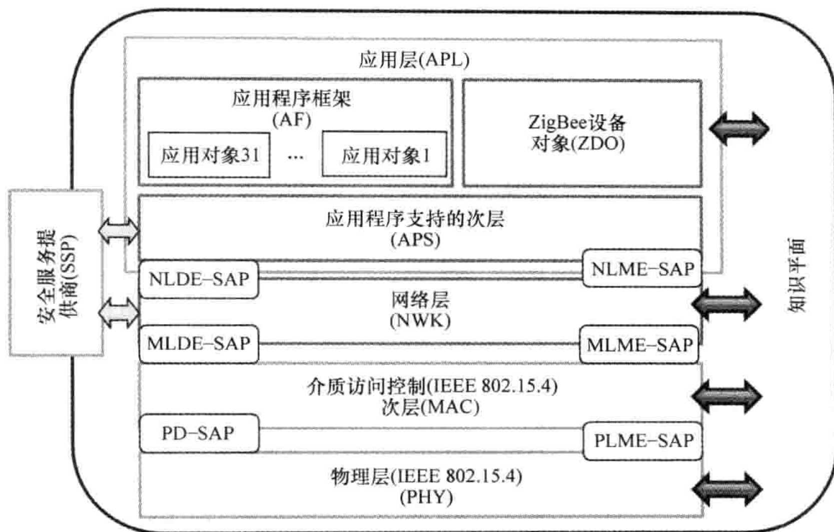


图 1.2　WSN 协议栈的知识平面

Thomas 等在无线通信领域中引入了有线通信领域的知识平面的思想，提出了 CN（Cognitive Network，认知网络）的概念[4]。CN 范式涉及端对端的网络目标，在一个数据流内包含了所有元素。它旨在通过打破分层网络堆栈以及实现整个网络的节点间通信来实现这些目标。

CN 被定义为一个自感知、自组织和自适应的能够做出智能化适应性修改的网络，主要基于以下几点：

1）观察由单个元素引起的网络状态变化。

2）在分层协议体系结构限制以外的节点之间共享信息。

3）在决定采取行动之前进行学习和推理，以优化网络性能[5]。

这些 CN 通过终端用户和应用获得端对端的关于网络性能的知识信息。

为了实现认知网络的目标，Thomas 提出了如图 1.3 所示的三层框架[6]。这些层由需求层、认知层和 SAN（software adaptable network layer，软件适应性网络层）组成。SAN 是该架构与物理世界的接口。配置的网络元素，如定向天线或认知无线电（其中发射功率可以自适应），形成了认知过程中的行为要素。这些被称为可修改的要素。对于每一个可修改的要素，在第 2 层的认知过程中都与认知元素有一对一的映射。认知层中的这些要素有助于在功能域和空间域实现操作分配。网络状态传感器为认知要素提供部分网络知识。级别最高的抽象层是需求层，它通过 CSL（Cognitive Specification Language，认知规范语言）为认知层的每个认知要素把端对端的对象传送到目标节点。认知层是这个架构的核心机制。它了解系统的状态，获取当前网络目标的相关信息，并对观察到的网络行为做出适当反应的决定。它使用一个反馈回路，用过去与环境的相互作

用来指导当前和未来的相互作用。OODA（Observe, Orient, Decide, and Act，观察、定向、决定和行动）循环[4]被用作反馈回路。

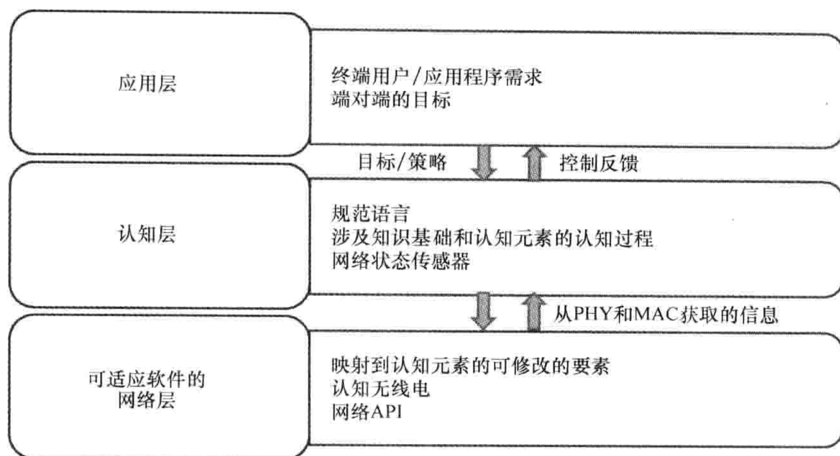


图 1.3 认知网络架构的例子

这些特点使学习并帮助网络解决方案收敛的速度快于网络状态的变化。这些想法可能会扩展到传感器网络框架上以使网络具有认知性。

1.2.2 用于传感器网络的认知技术

本节介绍了 WSN 研究的最新发展趋势，这在很大程度上包括了研究人员为提高 WSN 性能而采用的认知方法。

1. WSN 中的认知无线电

Cavalcanti 等[7]介绍了基于 CR 的 WSN 的一个概念性的设计，并与标准化的 ZigBee/802.15.4 的 WSN 进行了性能比较，二者都是基于 OPNET（ZigBee/802.15.4）可用的标准模型建立起来的，工作在 2.4GHz 频段。在这个实验中，Cavalcanti 等[7]假设基于 802.15.4 协议的 CSMA（Carrier - Sense Multiple Access，载波侦听多址接入）方法在 MAC 工作在非信标模式，基于 ZigBee 协议在网络层（基于表的网状路由）和应用层工作于 CR 和 2.4GHz 模式。假设发射和接收天线具有相同的单位增益。接收器灵敏度设置为 -85dBm，认知无线电信道集中在 680MHz，第一频道在 2.4GHz 频带。从这些仿真结果中作者发现，对于相同的发射功率，CR 信道的最大通信范围几乎是在 2.4GHz 信道中的两倍。范围的增加减少了每包的跳数和隐藏的节点问题，从而提高了多跳路由和 MAC 的工作效率。整个应用的吞吐量也证实在 CR 模式中更好。

Akan 等[9]也谈及认知无线电传感器网络的主要设计原则、潜在优势、应用领域和网络架构。他们探索了将认知无线电和 WSN 的现有技术应用于此类网络的可能性，并

认识到这样做的挑战。

2. 使用神经网络模型的认知方案

Reznik 和 Pless[1]通过研究信号变化检测问题建立了使用分布式智能将认知嵌入到传感器网络的可行性。它们将 ANN（Artificial Neural Network，人工神经网络）的架构映射到传感器网络中，实验证明这种方法在减少资源消耗（网络带宽、处理器功率和内存使用量）以降低连接和通信成本方面具有优势。

Youssef 和 Younis [10]提出了 GRISP（Gateway Relocation algorithm for Improved Safety and Performance，提高了安全性和性能的网关搬迁算法），一个在 WSN 环境中评估不同位置的网关/汇聚节点安全性的运用遗传算法训练的神经网络模型。每个被访问位置的“威胁指数”和被捕获的快照，一起来训练神经网络。这有助于神经网络为未来的安全搬迁决定生成一个“风险评估因子”。

3. 认知传感器网络

Shenai 等[11]描述了智能化可靠运行的大电网的一种基于 WSN 的分布式控制系统。传感器数据（电压和功率因子）被报告给可以与附近单元进行通信的智能尘埃，以及一个可以映射到需求层的“控制站”。AUTOMAN（一个尘埃和控制站运行的软件认知代理）据说具有局部策略知识以及终端应用的端对端操作需求的意识。通过传感器协调技术和智能数据融合技术的相结合，动态决策得以发送，足够的信息管理得以实现。因此，即使在不断变化的环境下，没有电网故障时也能实现动态重新配置，该系统还可以确保客户的 QoS（Quality of Service，服务质量）要求总能得到满足。

Boonma 和 Suzuki 提出了 MONSOON[12]——一个受生物启发构建的认知 WSN 应用的框架。该框架能很好地解释相互冲突的设计对象（数据率、数据保真度、功耗），在给定约束时找到最佳的权衡，并自主地适应网络动态。它把应用模拟成从单个节点收集传感器数据并传送到基站的分散的软件代理组。通过模拟，Boonma 和 Suzuki 通过它在一个给定的约束条件下满足相互冲突的对象描绘了其适应网络动态的特性，并展示了其自配置、自优化和自愈的性能。

4. WSN 能量效率和安全性的博弈论表示

Machado 和 Tekinay 介绍了 WSN 中的能量效率和安全性的博弈论解释的调查[13]。他们发现，博弈论研究开发了 WSN 的分布式决策能力和各个节点的自私行为，以优化节点级（节省电池电量）和网络层面（网络利用率最大化，这与涉及的传感器数目成正比）的性能。他们讨论利用博弈论的方法通过物理层的功率控制博弈和应用层的速率分配博弈进行分布式跨层优化。在处理 WSN 中的安全问题时，Machado 和 Tekinay 展示了他们利用博弈论模型分析 WSN 上的有恶意节点和外部入侵者攻击形势方面所做的工作。他们也讨论了将追逃博弈运用于 WSN 的模型检测、跟踪和监控应用中。

5. 认知和自我选择性路由

Gelenbe 等[14]介绍了实现 WSN 路由服务质量（QoS）的新方法：CPN（Cognitive Packet Network，认知分组网络）和使用不同形式进行学习的 SSR（Self - Selective Routing，自我选择性路由）算法。CPN 路由使用 SP（Smart Packets，智能包）发现路径，

同时运用随机神经网络强化学习。它具有适应流量负载变化的能力，并具有网络的多向可扩展性。另外，SSR 技术利用信息素为基础的通信，其灵感来源于群居的蚂蚁向同伴传递走过的路径信息。在每个节点上都有自我选择性路线，这导致了额外的开销，但也使网络得以具备对意想不到的链路故障或不可靠的连接情况的适应能力。两种算法都能够在不同程度上支持容错，在不同的应用环境中其协议结构允许不同等级的效率。

参考文献[16]中已经对此类的几个技术进行了概述。表 1.1 提供了参考文献[16]中涉及资料的一个简要的总结。

表 1.1 适用于传感器网络的认知技术的对比

技术	认知实现目标	实现这些目标的途径	基于知识/学习/推理/内容感知的认知	认知对端对端网络目标的影响
WSN 中的 CR[7]	增加通信范围和应用吞吐量	PHY 执行 CR	内容感知	无
ANN[2]	通过降低连接和通信成本减少资源消耗	通过映射 ANN 到 WSN 架构实现分布式智能	推理	在有限的范围内有
GRISP[10]	WSN 网关节点的安全搬迁决策	用遗传算法进行神经网络模型训练以评估汇聚节点的安全性	学习	无
CSN[11]	智能化可靠管理运作的大电网，确保终端用户的 QoS 要求始终得到尊重	带有被称为 AUTOMAN 智能软件主体单元的分布式传感器通信，使系统感知终端用户的需求并启用动态重新配置	知识，内容感知	有
MOONSOON[12]	借助软件主体具有自配置、自优化和自愈性能的网络	灵感来自生物学的框架，通过在给定的约束条件下满足相互冲突的目标、适应网络动态的分散的软件代理	知识，内容感知	在良好的程度上有
博弈解读[13]	通过 WSN 能量效率和安全性的博弈论解释改善网络和节点级的性能	实现分布式跨层优化的 PHY 的功率控制博弈和应用层的速率控制博弈；其他分析 WSN 中安全问题的博弈论模型	可能只被视为一个分析工具，而不是认知	无
认知和自我选择性路由[14]	在不同的应用环境中 WSN 的 QoS 路由	实施不同形式的学习，如 RNNRL 和基于信息素技术的认知路由	强化学习	无
自适应调制和睡眠调度[15]	在环境监测应用中的更好的节点生命周期	主要用于 PHY 和 MAC 层的一种认知算法，使用信道条件和调制速率反馈的自适应睡眠	从反馈中学习	无

从表 1.1 中可以得出以下推论:

1）能够影响端对端的网络目标，具有基于学习、推理或背景感知或其组合的一体化认知的应用。

2）应用于体系结构/应用级的认知技术比那些在协议栈的特定层引入的具有更显著的网络范围的影响。

3）使用分布式/分散方法实现认知决策的应用在实现网络部署目标和应用需求变化上更成功。

参考文献[16]中给出的结果显示了网络中跨层无缝共享信息的优点。在所有的方法中，Shenai 和 Mukhopadhyay[11]以及 Boonma 和 Suzuki[12]提出的方法与作者在传感器网络中引入认知的观点最接近，因为它们能够动态地适应不断变化的网络条件，并不断跟踪应用的要求，具有全网络的影响。

这些应用于传感器网络的认知技术的确有望改进跨层设计方法，特别是因为它们都是基于知识和学习能力。然而，这些技术并没有探讨知识平面的思想，也没有一个明确的可以扩展到所有传感器网络应用的框架。

接下来提出了一个通用的基于 KP 概念的认知节点架构和认知网络框架[30]。一旦战略部署于传感器网络中，这些认知节点将有助于传感器网络实现认知，并且这一概念也可以适用于各种各样的传感器网络应用。

1.3　认知无线传感器网络的通用架构

本节介绍了最初由 Vijay 研究发展而来的通用的认知节点架构[30]。网络中部署着许多认知节点。这些节点可能会或不会配备传感器，但都是为了改善系统性能而部署的。

当网络端对端的目标传送运行持续时间最大化时，部署传感器网络的目的才得以充分地实现。端对端的目标可能涉及网络协议栈的每一个要素——应用层、网络层、MAC 层和物理层。它们还包括整个网络中数据流的目标。因此，实现网络端对端的目标包括满足不同层的多个经常相互冲突的需求。通过使用具有学习和推理能力的认知技术与智能优化技术，将能够更好地实现一个传感器网络的目标，从而使应用对象的生命周期最大化，同时提高终端用户的满意度。

网络端对端的目标包括:

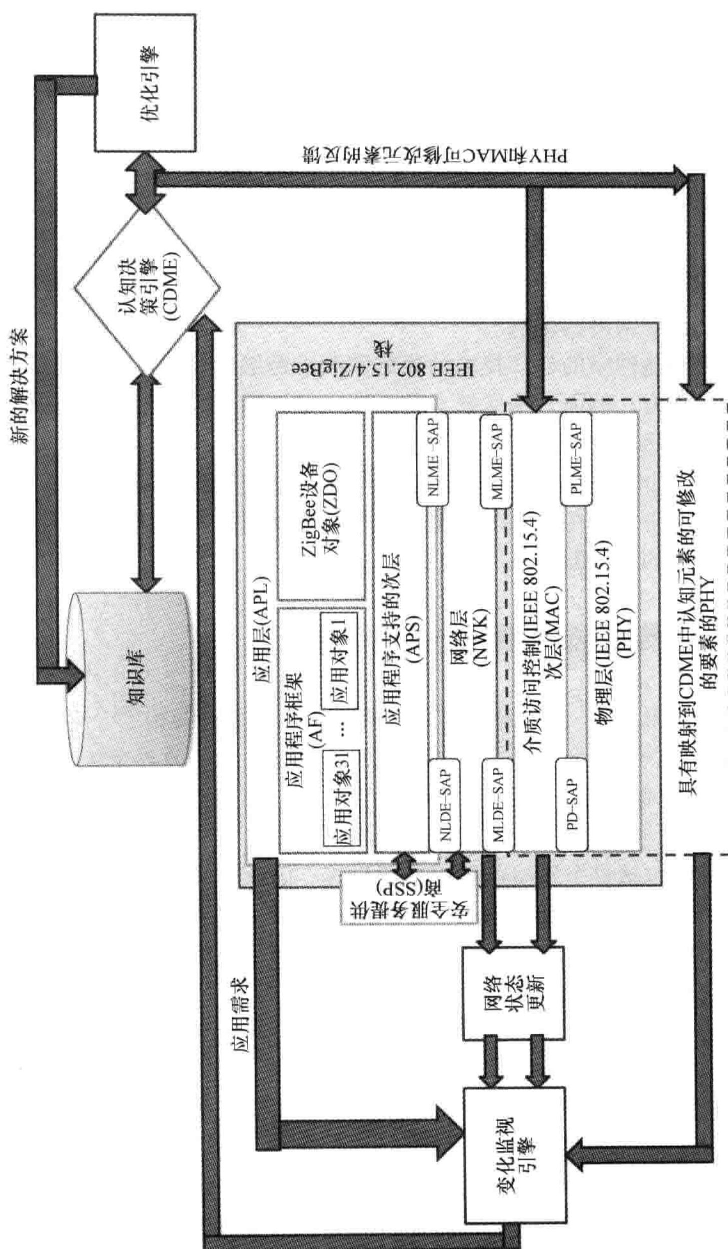
1）在一个异构的 WSN 环境中满足不同的应用需求。

2）满足物理层要求，如固定的 BER（Bit - error Rate，误码率）或保持一定的发送功率要求。

3）当节点不工作或改变角色时维持一定的网络覆盖范围和连通性的要求。

4）担负 MAC 的部分职责，进行结构调度和处理信道接入。

为了实现这些目标，并且不失一般性，这种方法对现有的 IEEE 802.15.4/ZigBee 的协议栈做出了修改，但这个概念也可以应用到其他协议栈。为了将学习、推理、决策和优化集成到现有的协议栈中，采用了如图 1.4 所示的认知节点架构。



优化引擎
PHY和MAC可修改元素的反馈
认知决策引擎(CDME)
新的解决方案
知识库
IEEE 802.15.4/ZigBee栈
应用层(APL)
ZigBee设备对象(ZDO)
应用程序框架(AF)
应用对象1
…
应用对象31
应用程序支持的次层(APS)
NLME-SAP
NLDE-SAP
网络层(NWK)
MLME-SAP
MLDE-SAP
介质访问控制(IEEE 802.15.4)次层(MAC)
PLME-SAP
PD-SAP
物理层(IEEE 802.15.4)(PHY)
具有映射到CDME中认知元素的可修改的要素的PHY
安全服务提供商(SSP)
网络状态更新
应用需求
变化监视引擎

图 1.4 认知节点架构

这里现有的IEEE 802.15.4/ZigBee协议栈已扩展到包括学习、推理、决策和优化的功能。

通过在节点级引入认知技术，借助于在网络中穿插的一些此类节点之间的相互作用，将能够在整个传感器网络中引入认知行为。这种增强的体系结构的重要特征是CDME（Cognitive Decision - Making Engine，认知决策引擎）、KB（Knowledge Base，知识库）、CME（Change Monitoring Engine，变化监测引擎）和优化引擎。认知节点的预期功能如下所述：

1）在应用端，监控用户/应用需求的细微变化，在认知决策时利用这些输入。

2）使用网络状态传感器的输入追踪有关网络状态变化的信息。

3）在知识库中存储有关具体行动及其结果的信息，据此查找预测未来的行为/认知决策。

4）网络决策之前从物理层获取信道条件信息。在监测频谱孔的可用性时（见第2章），异构无线环境中无许可证的频段也可能被开发利用。

现在来描述认知节点每个组件的特征。

1.3.1 ZigBee协议栈

IEEE 802.15.4 - 2006[25]是定义ISM（Industrial，Scientific，and Medical，工业、科学和医疗）免许可证的、工作在2.4GHz和868/915MHz频段的WSN设备之间的物理层和媒体访问层的无线电通信标准。ZigBee建立在802.15.4标准之上，定义了网络层和应用层以及一个SSP（Security Service Provider，安全服务提供商）[24]。因此，ZigBee协议栈由基于IEEE 802.15.4标准的物理层和媒体访问控制层以及基于ZigBee标准的网络层和应用层组成。协议栈的不同层之间的通信使用SAP（Service Access Points，服务接入点），是由一个特定层提供给上层的为DE（Data Entity，数据实体）或ME（Management Entity，管理实体）服务的接口。一个ZigBee网络内定义了三种类型的装置：一个启动和配置网络的协调器、一个支持关联和将消息转发给网络中其他设备的路由器、一个将感测数据传送到ZigBee网络中其他设备的终端设备。APL（Application Layer，应用层）的ZDO（ZigBee Device Object，ZigBee设备对象）定义了这些角色，还负责发起或响应绑定请求和保护网络设备之间的关系。它支持星状、集群树和网状拓扑结构，网络层支持网内与启动网络、寻址、路由和同步相关的所有功能。在AF（Application Framework，应用框架）内制造商定义的应用对象实现了根据ZigBee自定义的应用描述的实际应用。IEEE 802.15.4标准的物理层和MAC以及ZigBee标准的网络层和应用层能在短距离内以非常低的功率消耗提供可靠的数据传输，从而使得在各种应用中部署传感器网络非常方便。

1.3.2 网络状态传感器

网络状态传感器跟踪MAC和NWK层的变化。诸如节点（终端设备/路由器/协调器）状态的信息、节点与相邻节点连接的信息、新入网节点或暂时离网节点的信息和

误包率是这些层中可以提供的类似于网络状态更新的输入。此外，IEEE 802.15.4 / ZigBee 协议栈提出，信息是固有的可获取和利用的，以支持传感器网络中的自组装功能。这些信息用于帮助认知决策。

1.3.3 物理层的输入

从物理信道可以收集很多信息，如路径损耗、衰落特性、遮蔽性能、信道可用性和容量、干扰电平、节点中电池的剩余电量信息以及与最近的相邻节点之间的物理距离，仅举这几例（见第 2 章和第 3 章）。这些信息在决策时是有用的，如估算从信源到信宿传送信息所需要的节点发射功率、基于信道条件选择最佳的路由路径、能耗和诸如可靠性、吞吐量等的应用 QoS 要求等。许多先进的传感器网络协议使用这些信息。然而，认知节点处于非认知网络的边缘，因为它们提供了从认知决策引擎到物理层和 MAC 层的反馈路径。认知引擎基于对网络未来行为的预测，向这些层发送一个有关变化的反馈，以节省电力或修改一些参数以满足终端用户未来需求的变化。例如，反馈可能包含有关发送功率变化的信息，或者如果设备可以切换到不同的操作模式（被动/主动），也可能指示物理层需要改变调制和编码方案等。因此，反馈环路可以帮助网络适应可预测的变化。

1.3.4 变化监测引擎

CME 收集了 ZigBee 协议栈所有层的更新信息并提供给 CDME，从而帮助它“学习”相邻节点的变化。收到这些更新的频率能时隙发送到认知引擎以便能及时改变决策，这样网络的生命周期实现了最大化，其性能也不受影响。

1.3.5 知识库

KB（Knowledge Base，知识库）是认知节点的信息仓库。它包含基于终端用户需求的预编程的输入，也就是说，传感器网络部署的目标应用的环境和物理层条件（传播环境、预期干扰电平等）。由于学习和优化程序被激活，它得到更新、更好、更准确的信息。通过这种方式，KB 可以对做出的最好的决定保持更新。KB 需要存储节点输入的信息、在特定的情况下做出的相关决定的信息以及这些决定对网络的影响，因为它与决策过程密切相关也对决策很有帮助。这意味着 KB 必须具有存储元件。为了以最简单的形式实现存储，这里提出的想法是在 KB 中以 LUT（Look - Up Table，查找表）的形式存储先前的决定。这样，KB 就会库存给定情况下及特定参数影响下网络工作情况的信息。这些输入将有助于 CDME 在不同的网络条件下做出积极的决定，从而促进网络认知。

1.3.6 认知决策引擎

CDME 是认知过程的核心。它利用网络状态感应器、物理层和应用层提供的可用信息，结合以前知识库中的可用信息，将之转换成有用的知识。图 1.5 表示认知节点的认

知决策引擎需要的逻辑输入，以便对节点/网络行为做出可靠的预测，并成功地实现网络的端对端的目标要求。

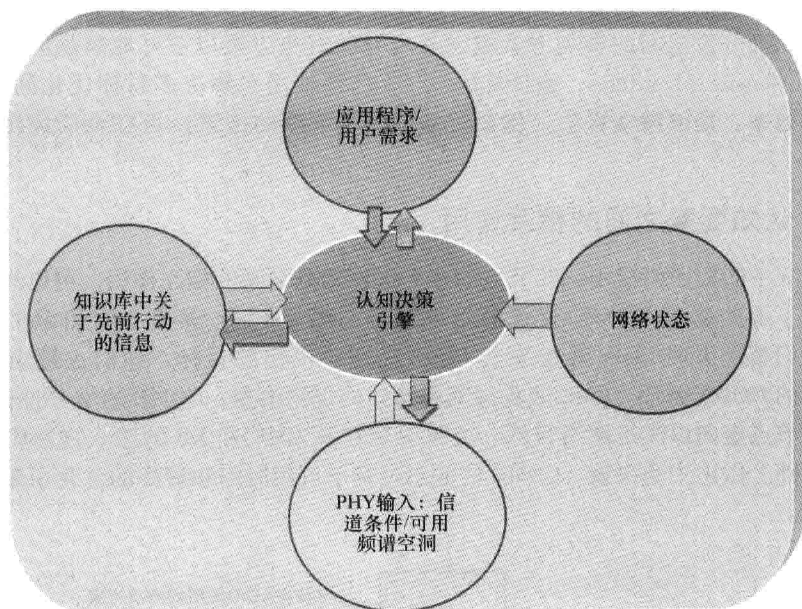


图 1.5　CDME 的输入

CDME 会结合某种形式的学习并实施决策机制，以帮助认知过程。机器学习技术经常被用于开发允许用户基于累积数据演变行为模式的算法。Forster[26]提供了一个很有价值的关于几种应用于无线专用网和传感器网络的机器学习技术的调查。

从物理层、MAC 层和网络层及终端应用需求中学习参数需要一个学习技术[23,26-29]。一旦网络工作，学习过程就被激活。基于一套规则/观测结果，可能会发生一系列动作。

为了协助决策过程，可以使用基于案例的决策理论[21]。Wang 等[22]在传感器网络中使用了基于案例的推理来解决聚类问题。然而，我们的目标是使 CDME 工作以实现网络端对端的目标，跟踪网络环境和终端用户需求的变化。

可以使用数字化设计技术（米利状态机）实现 CDME。在此状态机中，输出不仅取决于当前的输入，也取决于以前的状态输出。状态可以被编码，而且最重要的位可以描绘应用变化。变化可以被随后的状态跟踪，并可以根据同时段其他层——PHY、MAC 和 NWK（按优先次序排列）随后的输入，进一步决定网络应如何反应。也可以探索将状态机分为两个相互作用的子部分的更多的可能性。一个状态机可用于跟踪节点内的本地进程，另一个跟踪由于节点间的相互作用导致的全局变化。

1.3.7　优化引擎

现在探索利用网络的有利条件将学习和优化过程结合使用的可能性。学习系统的反

馈可以通过对系统行为与期望的优化输出之间的比较增强优化程序。学习系统可以在时间约束的情况下，通过提供过去开发并存储在 KB 中的已知的解决方案帮助决策，最接近于当前的系统需求。当有足够的时间可以提供更好的解决方案时，优化过程就可能会被激活，从而开发出新的解决方案或发展现有的解决方案以更好地满足应用需求。例如，GA（Genetic Algorithms，遗传算法）[18-20]已经被用于解决多目标优化问题。此外，为了提高效率，局部搜索算法（例如，基于梯度下降的搜索）可在全局优化执行之后运用。

1.3.8 认知要素之间的相互作用

图 1.6 中的框图概括了认知节点的各个组成部分之间的相互作用。可以想象，所有要素，除了那些属于 WSN 协议栈的组成部分，都是 Clark 等提出的知识平面的一部分[3]。他们帮助实现 Clark 等在关于 KP 的描述中提出的目标。他们也遵循了 Thomas 等[4]提出的 OODA 循环。CME 收集局部和整体的观测信息。CDME 的学习过程和 KB 的输入帮助节点定向以满足网络目标。决策引擎在从 CME 和 KB 的输入推断得出的知识信息的基础上做出主动决策。CDME 的输出可基于可用时间和资源的优化引擎，进一步得到优化。

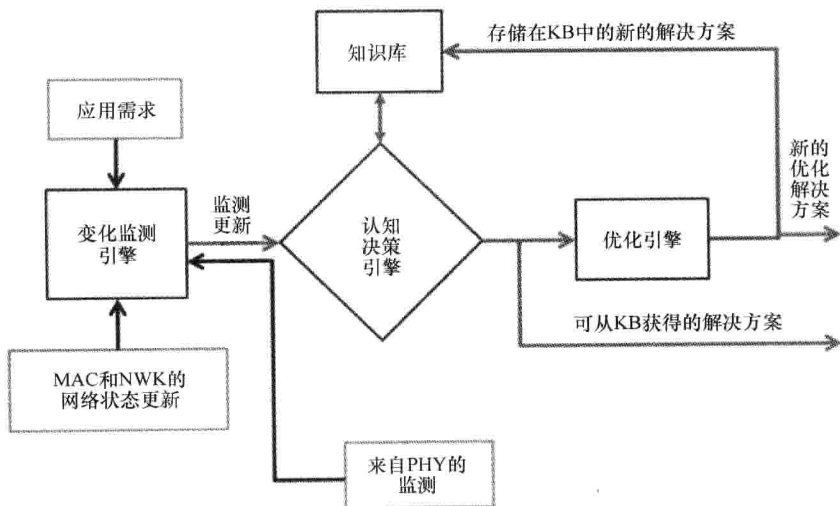


图 1.6　增强的协议栈的各个块之间相互作用的简化框图

CDME 的输出（优化和未优化的）反馈到 PHY 和 MAC，以适应网络条件和应用需求，从而完成 OODA 循环。

总之，认知节点需要以下功能：

1）提供一个可以存储关于网络具体行动的有用信息的知识库，并能读取信息以帮助网络认知决策。

2）提供诸如强化学习的技术，这将有助于网络基于以前的行为和/或观察来预测未来行为。

3）网络状态传感器必须联合可以识别有用信息、舍弃无关信息、传达重要信息的进程，以帮助优化网络连接。

4）辨别何种网络状态信息有益于认知决策和延长网络生命周期。

一旦这样的节点被开发出来，为了量化部署了一些认知节点的网络所实现的认知水平，可以使用表 1.2 所列的九个级别的标准。Mitola 和 Maguire[18] 首次讨论了这些认知级别。按照这个标准，8 级表示网络可以实现的最高水平的认知，其中的节点变得能够提出和磋商新的协议。我们的目标是尝试和实现最高水平的认知。

表 1.2　认知节点实现的认知等级

0 级	预编程：软件无线电
1 级	目标驱动：根据目标做出无线电/网络决策，需要环境感知能力
2 级	内容感知：认识到用户试图做什么（分布式中央智能）
3 级	无线电/网络意识：认识到无线电和网络的组成
4 级	能规划：分析形势（2 级和 3 级）以确定目标；遵循规定的计划
5 级	管理谈判：与其他无线电、网络或处理实体对计划做出决策
6 级	学习环境：自主决定环境结构
7 级	适应计划：生成新的目标
8 级	适应协议：提出并协商新的协议

1.4　结论

本章建立起了认知无线传感器网络的基础及其架构，讨论了 WSN 实现认知的几种方法。应该指出的是，一个完整的实现认知的 WSN（如包括九个级别的认知）在文献中还不存在。存在的只是实现认知概念的某些方面的尝试。

本书其余章节将针对一些认知功能列举实现上述思想的例子。第 2 章针对基于频谱感知和随机频谱接入的认知无线电网络（物理层认知）。第 3 章致力于自适应调制、自适应功率和自适应媒介访问。第 4 章介绍无线传感器和专用网络的跨层研究。第 5 章涵盖认知多样性路由（主要集中在物理层和网络层）。第 6 章研究在实现端对端目标的同时感知环境和参数优化的认知引擎。最后，在了解了基于节点位置信息的一些认知算法和协议之后，第 7 章研究基于位置的 WSN 节点的硬件实现。特别是，本章强调将 GPS/INS 组合与基于 ZigBee 的 WSN 节点相结合。

参考文献

1. L. Reznik and G. Von Pless, "Neural networks for cognitive sensor networks," *IEEE International Joint Conference on Neural Network*, IJCNN 2008, June 2008, pp. 1235–1241.
2. D. H. Friend, "Cognitive networks: Foundation to applications," PhD diss., Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Va., March 6, 2009.
3. D. D. Clark, C. Partrige, J.C. Ramming, and J.T. Wroclawski, "A knowledge plane for the Internet," *Proceedings of the SIGCOMM* 2003, Karlsruhe, Germany, August 2003, pp. 3–10.
4. R. W. Thomas, L.A. DaSilva, and A.B. MacKenzie, "Cognitive networks," *2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, DySPAN 2005, pp. 352–360.
5. R. W. Thomas, D.H. Friend, L.A. DaSilva, and A.B. MacKenzie, "Cognitive networks: Adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives," *IEEE Communication* 44, no. 12, December 2006, pp. 51–57.
6. R. W. Thomas, *Cognitive Networks*, PhD diss., Computer Engineering, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Va., June 15, 2007.
7. D. Cavalcanti, S. Das, J. Wang, and K. Challapali, "Cognitive radio based wireless sensor networks," *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Communication and Networks*, 2008, ICCCN '08, pp. 1–6.
8. J. Mitola III and G.Q. Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal," *IEEE Personal Communication* 6, no. 4, August 1999, pp. 13–18.
9. O.B. Akan, O. Karli, and O. Ergul, "Cognitive radio sensor networks," *IEEE Network* 23, no. 4, July–August 2009, pp. 34–40.
10. W. Youssef and M. Younis, "A cognitive scheme for gateway protection in wireless sensor network," *Applied Intelligence Journal* 29, no. 3, 2008, pp. 216–227.
11. K. Shenai and S. Mukhopadhyay, "Cognitive sensor networks," *IEEE 26th International Conference on Microelectronics (MIEL)*, May 2008, pp. 315–320.
12. P. Boonma and J. Suzuki, "Exploring self-star properties in cognitive sensor networking," *Proceedings of IEEE/SCS International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, Edinburgh, June 2008, pp. 36–43.
13. R. Machado and S. Tekinay, "A survey of game-theoretic approaches in wireless sensor networks," *International Journal of Computer and Telecommunications Networking* 52, no. 16, November 2008, pp. 3047–3061.
14. E. Gelenbe, P. Liu, B.K. Szymanski, M. Lisee, and K. Wasilewski. "Cognitive and self-selective routing for sensor networks," *Journal of Computational Management Science*, August 14, 2009. Berlin-Heidelberg: Springer, vol. 6, pp. 1–22. Available online: www.springerlink.com/index/j351352425w41v68.pdf.
15. E. Bdira and M. Ibnkahla, "Performance modeling of cognitive wireless sensor networks applied to environmental protection," *Proceedings of the IEEE GLOBECOM'09*, Honolulu, Hawaii, 2009.
16. G. Vijay, E. Bdira, and M. Ibnkahla, "Cognition in wireless sensor networks: A perspective," Invited paper, *IEEE Sensors Journal* 11, no. 3, March 2011.

17. I. Dietrich and F. Dressler, "On the lifetime of wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks* 5, no. 1, February 2009, pp. 1–39.
18. D.B. Jourdan and O.L. de Weck, "Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm," *Vehicular Technology Conference*, 2004. VTC 2004 Spring. 2004 IEEE 59th, 2004, vol. 5, pp. 2466–2470.
19. H. Li, Y. Ding, Z. Zhang, and H. Zhang, "Node power management design in wireless sensor networks based on genetic algorithm," in *Networking and Digital Society (ICNDS)*, 2010 second international conference, 2010, pp. 191–194.
20. A.P. Bhondekar, R. Vig, M.L. Singla, C. Ghanshyam, and P. Kapur, "Genetic algorithm based node placement methodology for wireless sensor networks," *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 2009, vol. 1, IMECS 2009, March 18–20, 2009, Hong Kong.
21. I. Gilboa and D. Schmeidler, "Case-based decision theory," *Quarterly Journal of Economics* 110, August 1995, pp. 605–639.
22. Y. Wang, K.W. Baek, K.T. Kim, H.Y. Youn, and H.S. Lee. "Clustering with case-based reasoning for wireless sensor network," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Advanced Infocommunication*, Shenzen, China: ACM, NY, Article no. 24, 2008
23. S. Hussain and A.W. Matin, "Energy efficient hierarchical cluster-based routing for wireless sensor networks," Jodrey School of Computer Science, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia Technical Report, pp. 1–33, 2005.
24. P. Kinney, "ZigBee technology: Wireless control that simply works," *ZigBee Alliance*, October 2003. Online. Available: http://www.zigbee.org/en/resources/
25. "IEEE standard for information technology: Telecommunications and Information exchange between systems, local and metropolitan area networks: Specific requirements Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs)," IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003), pp. 0_1–305, 2006.
26. A. Forster, "Machine learning techniques applied to wireless ad-hoc networks: Guide and survey," in *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing* (ISSNIP), 2007.
27. Ma Di and Er Meng Joo, "A survey of machine learning in wireless sensor networks from networking and application perspectives," in *Information, Communications & Signal Processing*, 2007 6th international conference, 2007, pp. 1–5.
28. V. Kulkarni, A. Forster, and G. Venayagamoorthy, "Computational Intelligence in wireless sensor networks: A survey," *Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, 2010, pp. 1–29.
29. A. Forster, "Teaching networks how to learn," PhD diss., Faculty of Informatics, University of Lugano, Switzerland, May 2009.
30. G. Vijay, "Cognitive wireless sensor networks," PhD diss., Queen's University, Kingston, Canada, 2012 (forthcoming).

第2章 认知无线电网络和动态频谱接入

2.1 概述

两个基本趋势共同促成了认知无线电（Cognitive Radio，CR）技术的发展。首个趋势是在发射器/接收器设计上自适应技术利用率的逐渐提高，例如，信道估计、功率控制、自适应调制和许多其他形式的响应周围环境激励的无线单元参数调适。这种趋势正好与SDR（Software-Defined Radio，软件定义无线电）概念的出现相符，作为通信单元，它展示出软件的大部分功能性。换言之，SDR是一个能够很容易支持不同技术、标准和环境条件的无线单元。第二个趋势是一种信念的不断增长——我们实际上正在接近无线电频谱的物理极限，尤其是在3GHz频带。这导致了一些频谱监管机构，如FCC（Federal Communications Commission，美国联邦通信委员会），开始修改其频谱分配策略。幸运的是，这揭开了低于3GHz范围的某些频带的频谱还没有得到充分利用的事实。这一发现促使人们寻找新的频谱接入手段以提高频谱利用效率。当这些看似孤立的发展趋势的潜能和预期可以同时实现时就汇聚到了一个点。这个点（CR技术）是一种很有前途的领域，能为无线通信带来灵活性、效率的新尺度，实现无缝通信。

2.1.1 认知无线电的历史

CR的概念是J. Mitola在他的博士论文（Mitola，2000年）中作为提高无线通信灵活性的手段首次描绘的，途径是增强无线电设备对周边环境和自身的感知能力。在那之后不久，FCC从这个技术中看到了频谱未充分利用问题的解决方案。2003年成立了SPTF（Spectrum Policy Task Force，无线电频谱政策任务组）以审议频谱分配策略并推荐CR为这一问题的补救方法（2003版提议规则公告）。其中首批为关于CR的著作做出贡献的有S. Haykin的作品（2005年）以及BWRC（Berkeley Wireless Research Center，伯克利无线研究中心）的系列出版物（Cabric、Mishra和Brodersen，2004年；Cabric等，2005年）。Haykin（2005年）为CR技术的信号处理和通信实现奠定了基础。同样的，Cabric、Mishra和Brodersen（2004年）以及Cabric等（2005年）为该技术的物理实现解决了一些基础性问题。在这些早期的贡献中，CR的两个主要任务被确定，即检测空置频段（也被称为频谱空洞）的频谱感知、有效利用这些频谱空洞的频谱接入。

CR的频谱感知与无线网络随机存取的CS（Carrier Sensing，载波侦听）具有一定的相似性。二者都需要在发起通信之前感知传输媒体。但是，它们之间也有两个主要的不同。第一，在CS中有几个接入信道，如果它们都很忙，传输将被推迟。另外，CR中接

入信道的数目很大，因此访问机会很多。第二，在 CS 中，所有节点都知道传输载体的确切特征，因此传感过程并不困难。但是，CR 却设想检测未知的或部分未知的通信信号来识别频谱空洞，这是一个重大的挑战。

文献中频谱接入较频谱感知的关注少。这是因为在正常情况下，一旦 CR 检测到频谱空洞，可以把它看作一个常规的通信发射机进行访问。然而，在过去的几年中，通过受益于 MIMO（Multiple - Input/Multiple - Output，多输入/多输出）和协同分集技术以及一次使用多个频谱空洞的方式来提高频谱利用率，已吸引了相当多的关注。

2.1.2　MIMO 和协同分集技术

MIMO 技术是指使用多个天线以提高系统容量和减轻信道损耗的一类技术，包括波束成形、空间复用及其他技术。波束成形技术是 MIMO 系统中用于直接传输和/或接收的一种信号处理技术。它旨在通过提高信号质量最大限度地增加通信吞吐量或减少干扰。在一般情况下，波束成形技术可应用于通过使用自适应或固定波束引导传输或接收波束来实现空间选择性。另外，空间复用技术用于通过使用不同的发送天线同时发送来自不同用户的消息。空间复用的主要优点是在相同的时间和频率资源（Larsson 和 Stoica，2003 年）内可以提高数据传输速率。

受到 MIMO 技术成功的启发，协同分集技术最近开始在各种无线应用中得到相当多的关注。具体地说，协同分集技术旨在克服无线系统的一些局限性，如传输范围和通信可靠性。协同分集蕴含的基本思想是，当一个消息从信源发送到目标节点时，也由网络中通常被称为中继器或通信伙伴的其他终端接收。这些中继器对消息进行处理并重新发送到目标节点。目标节点将来自信源和通信伙伴的消息进行合并，在这个过程中，系统利用同一消息多次接收的优势提供了空间分集。这一思想如图 2.1 所示。协同分集的另一个优点是通信终端之间通过分布式空间处理对干扰的显著抑制（Sendonaris、Erkip 和 Aazhang，2003 年 a，2003 年 b）。

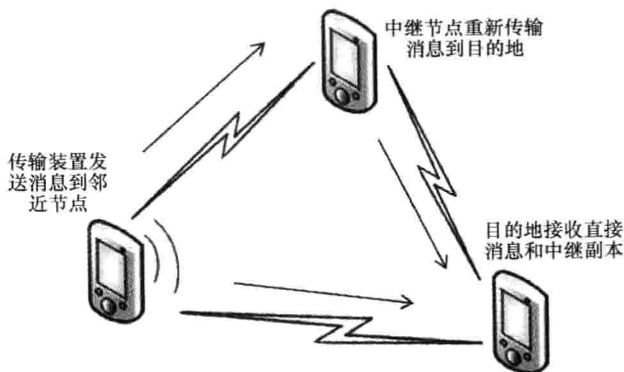


图 2.1　协同分集示意图

最近，业界对从CR网络的MIMO系统优势中受益的关注增加了。正如将在随后的章节中看到的，MIMO系统可以用于DSA（Dynamic Spectrum Access，动态频谱接入）的检测和频谱接入的两个过程中。在过去的几年中，这一兴趣开辟了新的研究方向。当一些传统的挑战如高效的波束成形技术设计需要重新考虑时，新的挑战如高效的协同感知方法设计出现了。

本章的其余部分安排如下。2.2节介绍和分析频谱感知的概念。其中提出了频谱感知的主要挑战和解决方法。2.3节专注于协同频谱感知，一个提高CR网络感知性能的有力工具。2.4节提出动态频谱接入，重点是其协同通信方面。最后，2.5节得出结论。

2.2　频谱感知

获取可用频带状态的准确信息是CR技术的核心任务。从广义上说，这个任务被称为频谱感知。获取频谱感知的方法分类如图2.2所示。类似的分类和全面的调查，参见Zhao和Sadler（2007年）、Yucek和Arslan（2009年）、Arslan（2007年，第9章）以及Fitzek和Katz（2007年，第18章）。

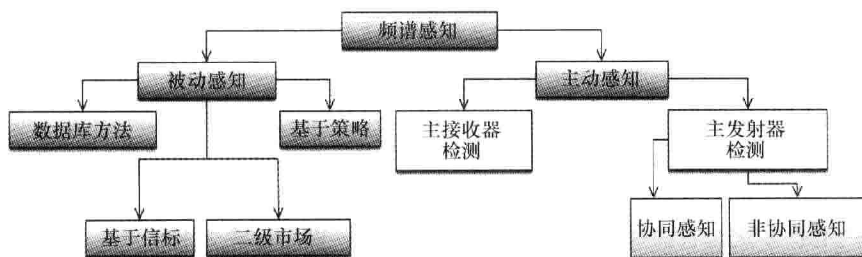


图2.2　频谱感知技术的分类

在图2.2中，频谱感知被分为两大类：被动感知和主动感知。第一类的CR依赖于其他实体或主体，或者甚至直接亲自与PU（Primary User，主要用户）通信，获取它计划利用的频带状态信息。此类别涵盖了广泛的技术，包括信标法（Hulbert，2005年）、二级市场（推进原则，2000年）、基于策略的信息交换（Mangold等，2004年）及其他很多（如Cave、Doyle和Webb，2007年）。例如，Han、Fan和Jiang（2009年）提出了替代CR网络监测频谱的一个独立的传感网络。当一个CR试图发送数据时，它与最近的传感节点协商获知可用的频带。一旦CR节点被指派了频谱空洞，就可以开始发送数据。因此，CR不需要自己监控频谱，相反，它们从连续监测频谱的传感网络中寻求途径。

几乎所有的被动感知技术都假设主要用户愿意与CR网络共享有关通信的一些信息。这些信息有助于CR获知频谱状态，可能是一个能使检测过程更容易周期性播送的导频信号。主要用户可以播送传输特性，甚至频谱利用模式。这个假设是在基于被动频

谱感知的 CR 部署上犹疑的原因之一。这也是一个引起主要的网络运营商日益不适的原因。

另外，主动频谱感知类在 PU 网络上没有假设。主动频谱感知在文献中被称为频谱感知，因为频谱感知技术仅仅依靠它们的感知能力获取频谱状态。此外，不同于被动感知技术，频谱感知技术对 PU 的传输不采取任何修改。换句话说，这是一个完全依靠 CR 节点的潜能实现两个网络之间共存的友好的部署。

频谱感知根据目标对象被细分为两种类型，如图 2.2 所示，即基于检测主接收器和检测主发射器。这两类中，检测主发射器的研究在文献中吸引了大部分关注，因为由于发射功率辐射，发射器比接收器更容易检测。

接收器检测的一个例子是电视接收机的检测。电视接收机没有任何传输能力。在检测 IEEE 802.22 标准中使用的电视频段内的频谱空洞时遇到了问题，如图 2.3 所示。

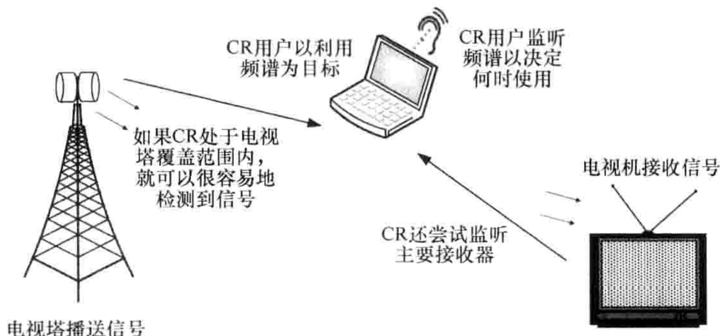


图 2.3　电视信号的检测

例如，Wild 和 Ramchandran（2005 年）利用电视机本地振荡器的功率泄漏来检测电视机的存在。尽管这种方法迫使频谱的可重用性发挥至极限，是不切实际的，并且是难以实现的。原因如下：首先，检测主接收机要么是不可能的——在它们没有任何辐射时，要么由于辐射功率较低是有限的以致距离非常短（Wild 和 Ramchandran，2005 年）；其次，即使假定 CR 知道所有的主接收机都不在位，只要主发射机（在 IEEE 802.22 标准情形下的电视塔）工作，它仍然不能使用这些频段。显而易见地，因为 CR 信号与主信号是共存的。因此，两个信号相互混杂，以较低信号功率工作的接收机将无法检测到自己的信号。

另外，文献中已对检测主发射机进行了深入的研究。这种类型的检测可局部执行——每个 CR 用户感知频谱以做出自己的决策而不需与他人协同，或者在全局范围内实施——CR 用户群合作感知特定频带的频谱。前一种方法被称为非协同感知，后一种方法被称为协同感知。显然，协同感知优于非协同感知，因为它能从所有个体 CR 的协同努力中受益，做出更好的关于频段状态的决策（Mishra、Sahai 和 Broderson，2006 年）。

接下来简要回顾高效频谱感知方法发展面临的主要挑战，随后是文献中提出的不同发射机感知方法的研究。

2.2.1 频谱感知的挑战

可以预见，CR 能够在了解现有主要用户少量信息的情况下运转。这一假设涵盖了规模不同的关于主要用户的先验信息。极端情况是，假设 CR 没有关于主要用户通信的知识信息。在考虑高效的频谱感知方法设计时，这种情况是最具挑战性的。与之相反的是，假设 CR 知道可用信号的确切信息，甚至与之同步。显然，这是一个有利于设计过程的挑战性小的情形。这两种情形之间，设计过程的难度随可用信息量的多少而变化。

一般来说，高效频谱感知方法发展面临着一些基本的挑战。其中一些挑战依赖于技术，如面向终端灵活的 RF（Radio Frequency，射频）需求和高分辨率的 ADC（Analog - to - Digital Converter，模拟 - 数字转换器），而其他取决于 PU 的信号性质、无线信道的状态和许多其他因素。这些类型的挑战这里也加以考虑。

首个挑战是隐藏的 PU 的问题（也被称为隐藏的终端问题）。这是随机接入无线网络中一个经典的问题。当 CR 无法检测到与部署于传输范围内的主接收机通信的活跃的主发射机时，CR 技术的这一挑战就出现了。这种情况如图 2.4 所示。

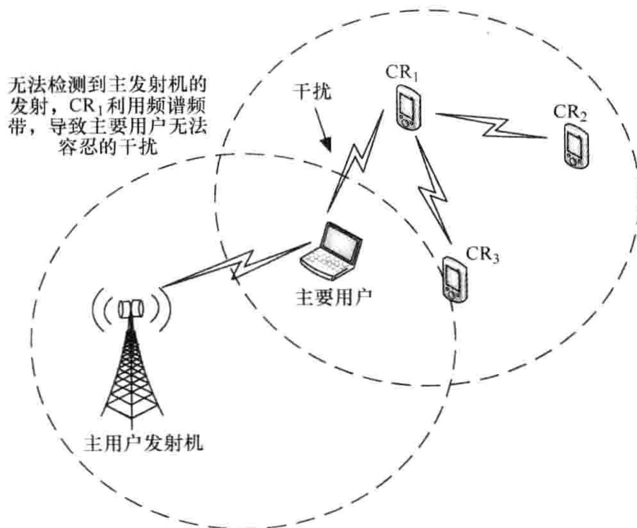


图 2.4 CR 系统隐藏的 PU 问题示意图

当这种情况发生时，CR 决定在 PU 使用的同一频带中发送信息，因此导致产生主接收机无法容忍的干扰。这个问题可能是由多重因素引起的，如 CR 感知频带时经历的深衰落和阴影。它也可能由一些物理障碍的存在引起，如建筑物或山脉。这个问题或许可以用协同感知解决，正如将很快在 2.3 节中看到的。

第二个挑战是当 PU 采用扩频信号时遭遇的。这些信号最初的设计是免疫干扰，因此，它们本质上是难以检测的。CR 要检测这些信号，就需要依赖于前面提及的被动频谱感知技术。另外，CR 可以利用被动—主动混合频谱感知技术，例如，PU 与 CR 共享的扩展码（直接序列扩频）或跳频序列（跳频扩频）。幸运的是，扩频信号主要用于蜂窝通信。FCC 测量（无线电频谱政策任务组 2002 年的报告）表明，蜂窝通信频段是占用最严重的频段，是很难有机会访问的。

第三个挑战是感知时间和撤退机制。CR 需要搜索一个空闲频带并使用它，只要 PU 不使用，一旦 PU 再次要求归还频带开始发送，CR 就需要立即撤出频带。如果 CR 在使用频谱感知，那么它需要立即感知主要用户的存在并撤离频带。

尽管这个问题极其重要，文献中却考虑甚少。解决这一问题的主要贡献是基于媒体访问控制层（MAC）协议（见 Xiao 和 Hu，2009 年，第 8 章）。提出的一些解决方案建议涉及多个机会频段，这样 CR 可以从一个频段移动到另一个频段以确保可靠的通信。然而，这些解决方案旨在保证 CR 的可靠通信，而不是减少主要用户的干扰。

特殊情况下还有许多其他的挑战，例如，协同感知中衰落对报告信道的影响、衰落和阴影对感知方法性能的影响、复杂性/鲁棒性的权衡等（Arslan，2007 年；Xiao 和 Hu 2009 年）。

2.2.2　频谱感知方法

文献中提出了多种频谱感知方法，每个都假设对于 PU 的信号具有某种程度的先验知识。最常用的研究方法是能量检测、循环平稳检测、协方差检测及其他，如匹配滤波。在本节中着重介绍前三种方法，简要描述其他方法。

1. 能量检测

当没有可用的主要信号的先验信息时，这是一个最佳的检测方法。因此，它是文献中最广泛使用的感知方法（Cabric、Mishra 和 Brodersen，2004 年；Ben Letaief 和 Zhang，2009 年；Ganesan 和 Li，2007 年 a，2007 年 b）。能量检测，正如其名称所暗示的，基于某些频段存在的能量估计对 PU 的存在做出判断。从数学上讲，一个判决指标的计算公式为

$$\gamma = \sum_{k=1}^{2TW} |r_k|^2 \tag{2.1}$$

式中　$\{r_k\}_{k=1}^{2TW}$——Ts 内接收到的 WHz 频带内的信号样本。

该判决指标随后与阈值 λ 进行比较，以判断 PU 的存在或不存在，即

$$\gamma \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \lambda \tag{2.2}$$

这里两个假设 H_0 和 H_1 分别定义主信号的缺席和主信号的存在。接收到的信号（假设只有 AWGN（Additive White Gaussian Noise，加性高斯白噪声）信道）为

$$r(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & H_1 \\ n(t), & H_0 \end{cases} \tag{2.3}$$

选择判决阈值是能量检测设计中的一个重大挑战。该阈值取决于附加噪声 $n(t)$ 的

方差。因此，正确地设计该检测方法需要很好地估计噪声方差。事实上，Sahai、Hoven 和 Tandra（2004 年）的研究表明，当噪声方差估计不准确时，能量检测的性能会严重下降。此外，它还显示，为保证所需的性能水平，总数为 O（$1/SNR^2$）的样本是必需的。换句话说，当 PU 信号的 SNR（signal to noise ratio，信噪比）降低时，需要延长观察时间 T。

2. 循环平稳检测

该方法利用主信号的周期平稳性特征检测 PU 的存在。这些特征是由于信号或其统计信息的周期性，如信号的均值和自相关函数。当主信号表现出强劲的循环平稳特性，CR 可以检测到它，即使是在低 SNR 条件下（Yucek 和 Arslan，2009 年）。在数学上，循环平稳检测仪做以下工作（Ben Letaief 和 Zhang，2009 年）：

1）计算所接收信号 $x(t)$ 的周期 ACF（Autocorrelation Function，自相关函数），为

$$R_{xx}^{\alpha}(\tau) = E[x(t+\tau)x^{*}(t-\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi 2t}]$$

式中 α——循环特征。

2）计算 CSD（cyclic spectral density，循环谱密度）即 ACF 的离散傅里叶变换：

$$S(f,\alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{xx}^{\alpha}(\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi ft}$$

3）搜索与 CSD 峰值（一个二维函数）对应的独特的循环频率。

这样就完成了检测过程。

这种检测方法优于能量检测，主要在于其对噪声信号的免疫力。换句话说，这种方法对噪声功率的不确定性是鲁棒的，由于噪声信号是一个广义平稳过程，其自相关函数没有周期性。然而，这种方法需要主信号的附加信息。特别是，它需要调制模式的先验知识以确定循环的频率。此外，该方法需要较长的观测时间和额外的实现复杂度（Yucek 和 Arslan，2009 年；Ben Lataief 和 Zhang，2009 年）。Han 等在 IEEE 802.22 标准的发展过程中测试了该感知方法（2006 年），结果表明在低 SNR 条件下，它比能量检测法性能优越。此外，Lundén 等（2009 年）也将这种方法扩展到两个方向：一是通过考虑多个循环频率来区分主信号和其他的 CR；二是提出了一个克服隐藏终端问题和信道损耗效应的合作方案。此外，通过利用不同信号的循环频率的唯一性，Oner 和 Jondral（2007 年）提出了一种提取 CR 信道分配信息的策略。Oner 和 Jondral（2007 年）考虑了 PU 使用 GSM（Global System for Mobile communications，全球移动通信）信号而次要用户使用 OFDMA（Orthogonal Frequency Division Multiple Access，正交频分多址接入）的 WLAN（Wireless Local Area Network，无线局域网）系统的情况。

3. 协方差检测

得益于主信号存在或不存在时接收信号协方差矩阵的结构差异性，Zeng 和 Liang（2007 年）提出了基于协方差的频谱感知方法。该方法将协方差矩阵的非对角线元素的估值与一些检测阈值进行了比较。在数学上，如果接收到的信号 $r(t)$ 被表示为上述式（2.3），则通过观察信号的连续 L 个码元，可以定义向量 $\boldsymbol{r}[k] = [r[k], r[k-1], \cdots, r[k-L+1]]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{s}[k] = [s[k], s[k-1], \cdots, s[k-L+1]]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{n}[k] = [n[k], n[k-1], \cdots, n[k-L+1]]^{\mathrm{T}}$。因此，可以记

$$r(k) = \begin{cases} s(k) + n(k), H_1 \\ n(k), H_0 \end{cases} \tag{2.4}$$

如果进一步定义了接收信号的相关矩阵 $\boldsymbol{r}[k]$ 为 $\boldsymbol{R}_r = E[\boldsymbol{r}[k]\boldsymbol{r}^{\mathrm{H}}[k]]$，其中 $(\cdot)^{\mathrm{H}}$ 是哈密顿算子，然后记

$$\boldsymbol{R}_r(k) = \begin{cases} \boldsymbol{R}_s(k) + \boldsymbol{R}_n(k), H_1 \\ \boldsymbol{R}_n(k), H_0 \end{cases} \tag{2.5}$$

其中，$\boldsymbol{R}_s[k]$ 和 $\boldsymbol{R}_n[k]$ 与上述 $\boldsymbol{R}_r[k]$ 的定义类似。已知附加噪声的相关矩阵 $\boldsymbol{R}_n[k]$ 是一个对角矩阵，协方差检测方法只是简单地将 $\boldsymbol{R}_r[k]$ 的非对角元素与一些阈值相比较。如果该信号是存在的，非对角线元素应该超越阈值具有非零值，否则，它应该是零。这一思想被 Zeng 和 Liang（2009 年）进一步发展，他们使用主信号存在或不存在时协方差矩阵的特征值分解及其特征值的变化。

协方差检测法与循环平稳检测法类似，具有对噪声方差存在鲁棒性的优点。然而，它们也依赖于对协方差矩阵的准确估计，这需要长时间的观察。此外，设定比较阈值是一个关键步骤。

4. 其他检测方法

文献中还提出有其他的频谱感知方法，包括基于小波变换的检测方法（Tian 和 Giannakis，2006 年）。此方法也被 Hur 等（2006 年）用于建立一个两阶段的感知方法。另一个著名的方法是匹配滤波检测。当主信号的完全信息可获得时，这是最佳的相干检测方法。然而，实施这种方法需要与主信号的时间同步。当 CR 和 PU 之间不存在直接的互动（通信或合作）时，实现这个目标太困难。有兴趣的读者可以参考 Arslan（2007 年）及 Fitzek 和 Katz（2007 年）关于这种检测方法的全面讨论。

到目前为止讨论的所有检测方法在做出在或不在这个频段的 PU 可用性的决策之前，要观察一些频带一段时间。最近 Lai、Fan 和 Poor（2008 年）提出了一个可供选择的办法，他们重申感知问题为一个变化检测问题，其间 CR 持续收听频段以搜索 PU 行为变化的例证。基于这一表述，设计出了一个最小化检测时间的快速检测方法。如果 CR 针对一组特定的频段并伺机利用其中的某些——一旦 PU 退出这些频段，这种变化检测方法是合适的。然而，它在搜索频谱宽带部分的频谱空洞上缺乏必要的灵活性。

使用相同的数学工具，Li、Li 和 Dai（2008 年）考虑了检测 PU，特别是电视频道的活动性的特殊情况。该难题是 CR 在恢复传输时检测 PU 发送的正弦导频信号时出现的。

总之，文献中研究了许多频谱感知方法。其中一些包括在调查论文中，如 Zhao 和 Sadler（2007 年）及 Yucek 和 Arslan（2009 年），而其他的在协同感知部分提及，如 Ben Letaief 和 Zhang（2009 年）及 Quan 等（2008 年）。

5. 不同感知方法之间的比较

至此，简单地提到了一些基本的频谱感知方法。很显然，不同的检测器适用于不同的场景。在所有的检测器中，能量检测器是最容易实现的。它能够感知任意的主信号而无须任何先验信息。Kostylev（2002 年）；Digham、Alouini 和 Simon（2003 年，2007

年)；Herath 和 Rajatheva（2008 年)；Herath、Rajatheva 和 Tellambura（2009 年）等研究了能量检测器在各种衰落信道及其多样性组合中的性能。

为了提高检测方法的检测性能，区分主信号与干扰和噪声是很重要的。然而，在实践中，这种区分只有在 CR 已知主信号的一些先验信息时才能实现。根据 CR 所有的有关主信号的何种信息，不同的检测器可应用于于不同的情况下。例如，基于协方差的检测器适用于已知主信号是相关的情况。另外，循环平稳检测器适用于主信号的周期已知。此外，匹配滤波检测器适用于主系统的导频信号已知，如电视频段的情形。一般来说，CR 用户对主信号了解得越多，检测器就工作得越好（见图 2.5）。

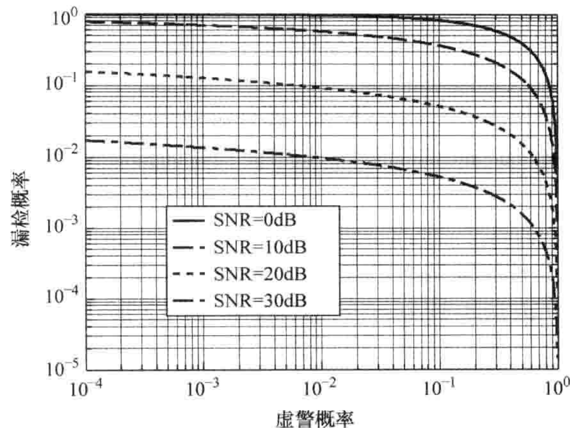


图 2.5 能量检测器在 SNR = 0dB、10dB、20dB 和 30dB 的瑞利衰落信道中的性能

由于 CR 技术本质上是一种无线通信技术，信道损耗对感知方法性能的影响是不能忽略的。无线信道损耗包括小尺度衰落、阴影和路径损耗。这些因素降低了感知方法的性能。大多数检测方法的性能退化已在文献研究中被明确，如能量检测器的例子（Kostylev，2002 年；Digham、Alouini 和 Simon，2003 年，2007 年)，或被暗示，如 Zeng 和 Liang（2009 年）研究的基于特征值（实际也是近似值）的方法，以及循环平稳方法（Lundén 等，2009 年)。事实上，由于要估计接收信号的自相关函数以得到循环功率谱，性能分析的过程变得很困难。

2.3 协同感知

允许多个 CR 在频谱感知上合作可以解决隐藏的终端问题（Cabric、Mishra 和 Brodersen，2004 年)。这种协同感知类似于无线传感器网络（WSN）中的分布式检测。在 WSN 中，每个节点都做出局部决策，并将其转发到一个基于某些融合规则做出最终决策的通用 FC（Fusion Center，融合中心）或中心节点（Ben Letaief 和 Zhang，2009 年)。这两个应用之间的主要区别是网络的覆盖区域。WSN 覆盖较小的区域（大部分时间),

CR 被假定覆盖更广泛的领域，因而设计协同感知更具挑战性。另外，CR 不像 WSN 节点那样用电池供电。因此，它们可以从设计协同感知的复杂和先进的信号处理技术中受益。

大部分文献的贡献侧重于窄带协同感知，其中 CR 联合感知特定的窄带频谱。另外，宽带检测允许 CR 来监控一组窄带频谱部分，这样当 CR 网络试图接入频谱时就有很多选择。在下面的章节中，将研究这两种不同的协同频谱感知。

2.3.1　窄带协同感知

协同感知可以是集中式或分布式的（Ma、Li 和 Juang，2009 年），这取决于决策过程。在集中式协同感知中，所有本地决策都发送到 FC 以做出最终决策并通知其所有的 CR，如图 2.6 所示。换句话说，集中式协同感知工作如下（Ben Letaief 和 Zhang，2009 年）：

1）如上所讨论的，每个 CR 使用某些感知方法进行局部感知。在介绍协同感知的几乎所有的论文中，都提及能量检测（Ganesan 和 Li，2007 年 a，2007 年 b）。

2）所有用户传递自己的本地决策到 FC。

3）FC 根据某些融合规则融合所有的数据以做出最后的决策。最终决策被发送给所有的 CR。

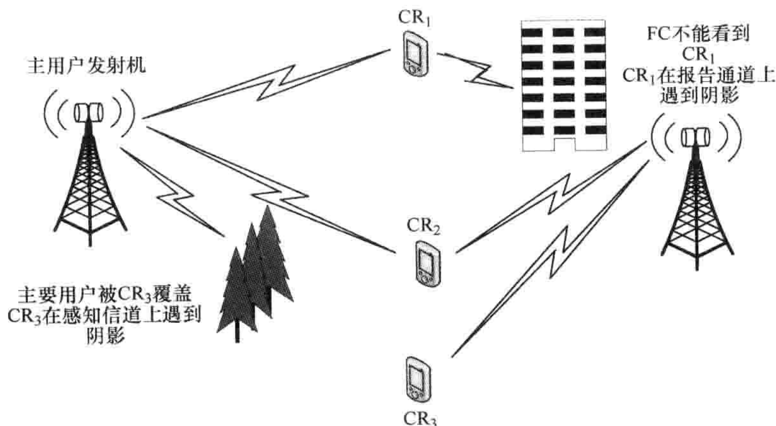


图 2.6　协同感知

另外，在分布式协同感知中，邻近的 CR 共享感知信息，每个 CR 利用自身的融合规则做出自己的最终决策。

假设一个组的 K 个 CR 感知一个特定的频段并把他们的决策转发到 FC。每个节点的决策用 d_i，$i=1$，…，K 表示。当 PU 存在时，$d_i=1$，当它不存在时（即频谱空洞可用），$d_i=0$。此外，用 R 表示 FC 做出的最终决策。因此，可以记

$$R = \sum_{i=1}^{K} d_i \begin{cases} \geqslant n & H_1 \\ < n & H_0 \end{cases} \tag{2.6}$$

其中 FC 在两个假设之间选择，当 PU 存在时选 H_1，而当它不存在且有频谱空洞可用时选择 H_0。如果至少有 n 个 CR 确定 PU 存在，FC 选择 H_1，否则选择 H_0。投票阈值 n 的选择定义了所使用的决策规则。有三种常用的决策规则（Ben Letaief 和 Zhang，2009 年）：与规则（$n=K$）、或规则（$n=1$）和多数规则（$n>K/2$）。与规则选择 H_1——如果所有的 CR 选择它。显然，这条规则在检测频谱空洞时是最具侵略性的规则。另外，或规则选择 H_1——如果至少有一个 CR 选择它。因此，这条规则是最保守的规则。最后，多数规则通过选择 H_1 在这些规则之间进行平衡处理——在大多数用户选择它时做出选择。这三项规则之间的性能比较如图 2.7 所示。很显然，或规则的检测概率优于其他规则，即实现了相同 SNR 和虚警概率约束下的最低漏检。

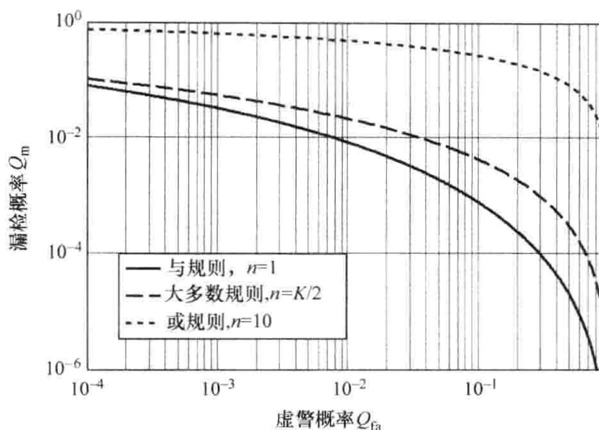


图 2.7　SNR = 10dB 和 $K=10$ 的衰落信道不同融合规则下集中式协同频谱感知的性能

式（2.6）中的模型确实是过于简化了。它并没有显示衰落和阴影对协同感知性能的影响。事实上，协同感知的性能取决于三个因素：在 PU 和 CR 之间的传感信道的状态、CR 和 FC 之间的报告信道的状态以及决策规则。Ghasemi 和 Sousi（2005 年）对协同感知报告信道衰落的影响进行了研究。特别强调的是空间相关阴影的情况。另外，文献中研究了传感信道衰落对一些感知方法的影响，如 2.2.2 节中提到的。这两个因素对协同感知性能的影响可以用空间分集来减轻。有多种方式实现空间分集，如 2.1.2 节中提到的。这些措施包括使用 MIMO 系统和使用协同分集。Digham、Alouini 和 Simon（2003 年）研究了使用 MIMO 系统提高各种衰落信道中能量检测的性能，Ben Letaief 和 Zhang（2009 年）最近研究了协同分集的使用。作者采用分布式 Alamouti 空时码让 CR 转达本地决策到 FC。利用这个协同方案，报告信道的错误率显著降低。在 2.3.2 节中进一步研究这个话题。

影响协同感知性能的第三个因素是使用的决策规则。在上面的模型中，FC 按照次优投票方案做出最后决策。该方案在报告信道减少开销上有不俗的表现。Quan 等（2008 年）提出了另一种可选的决策规则，将最优的（当没有 PU 先验信息可用时）能

量检测方法拓展至 FC。换句话说，每个 CR 转发测量数据（也称为汇总统计数据）到对数据进行优化合并并做出最终决策的 FC。在数学上，每个 CR 转发汇总统计数据 $T_i(x_i)$，$i=1,\cdots,K$ 到 FC，FC 计算似然比 $L(y)$，$y=[T(x_1),\cdots,T(x_K)]^{\mathrm{T}}$，为

$$L(y)=\frac{P(y|H_1)}{P(y|H_0)}\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}\gamma \tag{2.7}$$

随后将结果与阈值 γ 比较以做出最终决策。显然，能量检测器所面临的困难相同，特别是选择决策阈值，在这个方案中也将遇到。然而，由于基于似然比的检测方法设计的复杂性，Quan 等提出了基于汇总统计数据的加权线性组合降低复杂性的决策统计。使用下面的规则简化决策统计：

$$L(y)=w^{\mathrm{T}}y\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}\gamma \tag{2.8}$$

以做出最后决策。可以选择权重向量 w 说明个体 CR 的贡献。例如，它可以是 SNR 的一个函数；大 SNR 的 CR 加权超过小 SNR 的 CR。Quan 等（2008 年）的研究表明，如果权重向量选择适当，这个次优决策规则的表现的确比得上基于似然比的方法。

2.3.2　宽带协同感知

CR 感知宽带频谱的能力是频谱感知文献（Tang，2005 年）中研究的一个重要课题。宽带检测的最初建议是假设允许 CR 扫描很宽的频谱范围的灵活的 RF 前端（Cabric、Mishra 和 Brodersen，2004 年），如图 2.8 所示。然而，这种设置是缓慢和不灵活的（Quan 等，2008 年），并且硬件上可用的灵活的 RF 前端是有限的。这项建议中的另一个问题是检测顺序，也就是说，检测方法应该从何处开始，接下来该检测哪个频段，以及如何在很宽的频谱范围内对频谱空洞优化搜索。

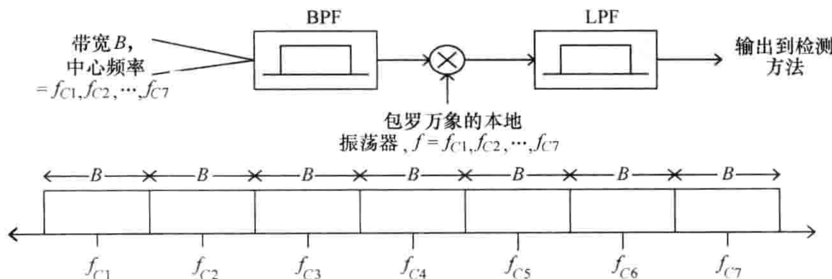


图 2.8　使用扫描电路的宽带频谱感知

实际上文献中已经涉及这些问题。例如，Luo 等（2009 年）将检测过程划分为两个阶段：粗略检测阶段和精细检测阶段。在第一阶段中，使用低复杂度的感知方法，如能量检测法，检测很宽的频谱范围。如果检测到频谱空洞，就调用第二阶段。在这个阶段，使用高精度的感知方法如循环平稳或匹配滤波法，对频谱空洞的确切位置进行搜索。分析结果表明：与传统的单阶段检测相比，当频谱空洞数量很小时，检测灵活性提高了。

Quan 等（2008 年）使用协同感知提出了宽带频谱感知的替代解决方案。它假定每个 CR 观察一组 K 个窄带频段并把所有频段的汇总统计信息转发到 FC。FC 将这些统计数据进行线性组合并与决策阈值进行比较［见式（2.8）］。用 $Y_k=[T_{k,1}, T_{k,2}, \cdots, T_{k,M}]^{\mathrm{T}}$ 表示 FC 汇总统计的第 k 个窄带；FC 使用下面的决策规则：

$$z_k = w_k^{\mathrm{T}} Y_R \underset{H_{0,k}}{\overset{H_{1,k}}{\gtrless}} \gamma \tag{2.9}$$

与式（2.8）的线性组合解决方案类似，权向量 w_R 的选择需要一定的设计标准。窄带情况下，Quan 等（2008 年）使用 SNR 标准设计了权重向量，在满足相邻 PU 网络干扰限制的同时，使 CR 网络的吞吐量最大化。

2.4 动态频谱接入

在了解了频谱感知过程的各个方面之后，现在看看频谱接入的方法。文献中研究了两种频谱接入的方法：频谱覆盖和频谱重叠（Zhao 和 Sadler，2007 年）。这两个方案如图 2.9 所示。

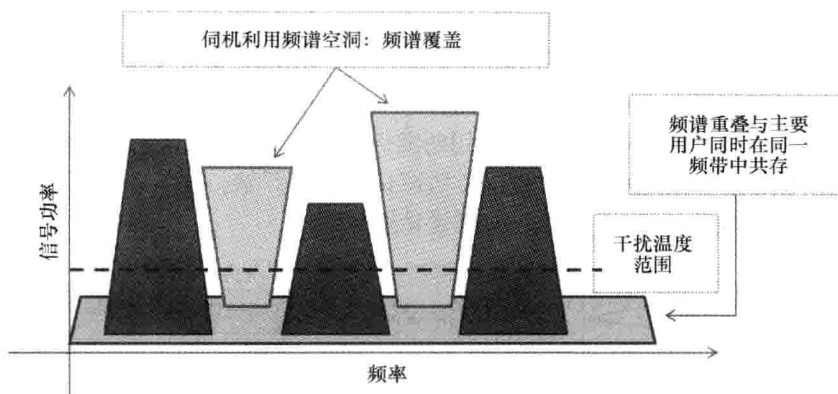


图 2.9 动态频谱接入

频谱覆盖中，CR 感知某些频带，一旦检测到频谱空洞，CR 就使用它进行传输。这种方法保护了 PU 的权利，只有当它不被 PU 使用时才利用这一频带，一旦 PU 恢复传输就撤出。从 PU 的角度来看，这种方法有两个关键问题：

1）CR 尽可能减少漏检的能力。漏检是一个频段被认为是空的而实际上它是占用的。

2）CR 在 PU 恢复传输时尽快撤出的能力。

促使发展高精度的感知方法和高效的协同感知方案的首要关注如前所述。虽然第二个关注可以看作首个的扩展，设计用于撤退的感知方法是不同于常规的感知方法的。后者旨在实现可靠检测，前者旨在尽可能地缩短检测时间。这种差异最近由 Lai、Fan 和

Poor（2008 年）发现，如 2.2.2 节中第 4 部分提到的，他们使用最快的检测结构设计了一种检测方法，该方法通过持续观察所使用的频段最大限度地减少检测时间。

另外，频谱重叠允许 CR 接入需要的频谱，只要它们不对相邻的 PU 产生有害的干扰。为了实现这种方法，需要在所有的 CR 中采用一个可靠的干扰控制机制。这种机制由以下步骤组成：

1）检测所有在附近的 PU，估算每一个距离。

2）判断每个 PU 的干扰限制。

3）计算发射功率使其不超过任何 PU 的干扰限制。

FCC 提出了衡量主接收器干扰的 IT（Interference Temperature，干扰温度）（干扰温度公制的创立，2003 年）。尽管事实是这种方法并不需要可靠的频谱感知，而 CR 可以在需要时接入频谱，该办法的发展造成了一些严峻的挑战：

1）CR 需要持续监控所有在传输范围内的 PU。这是一个具有挑战性的过程，需要先进的信号处理技术，诸如到达角估计和从每个 PU 接收的功率估计。此外，当 PU 移动时，这个过程需要连续地进行。

2）对于每个相邻的 PU，需要指定 IT。事实上，IT 的概念在文献中引起的关注较少，因为估计它实际上是很难的（Haykin，2005 年）。此外，Clancy（2007 年）的研究显示有不止一个独特的方式来定义 IT，每一个都对 CR 可实现的吞吐量以及相邻的 PU 的性能有不同的影响。需要确定 CR 使用的适当的功率控制方法。在底层的方法中，CR 调整它们的传输功率，以满足所有相邻 PU 的 IT 限制。然而，这可能显著地影响 CR 网络的性能。

对于这些挑战，文献中更侧重于频谱接入的频谱覆盖方法。事实上，即使是 FCC 也撤回了它们自己的有关 IT 的命题（回复：干扰温度公制的创立，2007 年）。然而，出于对可能的频谱接入的考虑，一些研究人员仍然研究了这一思想（Zhang 和 Liang，2008 年；Zhang、Liang 和 Xin，2008 年）。

2.4.1　频谱接入的 MIMO 系统

在频谱重叠方法中，如果不对 PU 产生有害干扰，允许 CR 作为 PU 在相同的时间和地理区域使用相同的频段。因此，设计 CR 的 MIMO 系统的传输矩阵变成一个具有挑战性的问题。CR 需要最大化自身的吞吐量，同时对邻近的 PU 保持可接受的干扰水平。

考虑如图 2.10 所示的 $N\times M$ 的 MIMO 系统。第 n 个时隙的传输向量是 $x[n]=[x_1[n], x_2[n], \cdots, x[N]]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{C}^{N\times 1}$。此向量中选择的符号决定了使用的 MIMO 系统的类型。如果符号是相同的（即 $x_1[n]=x_2[n]=\cdots=x_{N-1}[n]$），那么系统发射机可实现空间分集；如果符号属于不同的用户，该系统是一个空间多路复用器。此外，如果符号是相同的并且被信道信息的权重向量分配了不同的权重，该系统就是发送波束成形的。最后，如果所接收的符号 $y[n]=[y_1[n], y_2[n], \cdots, y_M[n]]^{\mathrm{T}}$ 也被某权重向量 w 加权，

则该系统就是发送/接收波束成形的。

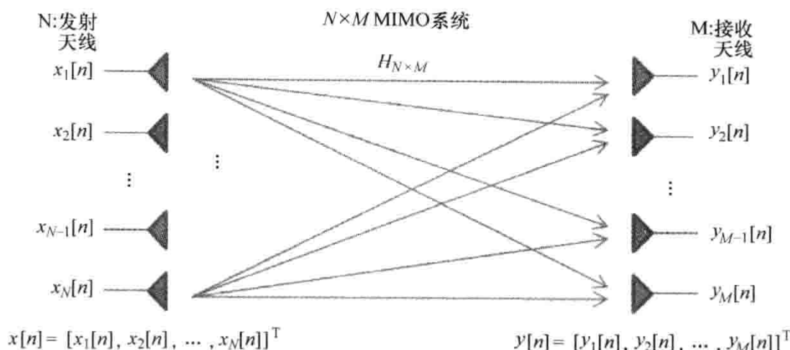


图 2.10 MIMO 系统

一般而言，这些波束成形向量的设计过程是一个优化过程，可以记作（Boyd 和 Vandenberghe，2004 年）

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad f_0(v,\ w) \\ &\text{subject to} \quad f_i(v,\ w) \leqslant b_i,\ i=1,\cdots,\ m \end{aligned} \tag{2.10}$$

对象或成本函数 $f(v,\ w)$ 决定了设计准则。它可以是错误率、平均 SNR 或其他的成本函数，正如 Palomar、Cioffi 和 Lagunas（2003 年）所讨论的。同样，约束函数 $\{f_i(v,\ w)\}_{i=1}^{m}$ 可以采取不同的形式。最常用的是发送功率约束和干扰约束。在 CR 的支持下，应解决类似的优化问题以设计波束成形向量。然而，成本和约束函数依赖于所考虑的情景。例如，Zhang 和 Liang（2008 年）假设一对 CR 要接入被一组 PU 所占据的特定的频谱，如图 2.11 所示。

还假定所有用户（CR 和 PU）都配有多个天线，CR 发射机准确地知道自己和所有 PU 之间的信道矩阵 $\{G_k\}_{k=1}^{K}$。Palomar 等（2003 年）认为能最大化一对 CR 的瞬时容量的设计发送协方差矩阵 $S \triangleq E[x[n]x^H[n]] \in C^{M_{t,s}\times M_{t,s}}$ 的问题有两个约束：发送功率约束和干扰功率约束。CR 的发射功率不应超过 P_t，而第 k 个 PU 的干扰不应超过 Γ_k。在一些特殊的情况下，此问题包含最佳的波束成形向量和空间复用向量的设计。事实上，该问题只能利用凸优化技术，如内点法（Boyd 和 Vandenberghe，2004 年），进行数值求解。然而，考虑一些特殊情况，提出了基于 CR 信道矩阵 H 的奇异值分解的次优解决方案。

解决优化问题的关键是假定 CR 和 PU 之间信道状态的先验信息。事实上，这种假设是不切实际的，因为两个用户之间不存在直接的通信。Zhang、Liang 和 Xin（2008 年）研究了不同情况下的类似方法，但是，原则是相同的。

在频谱重叠方法中获得所需要的信息很困难，这就使得设计有效的 MIMO 系统成为

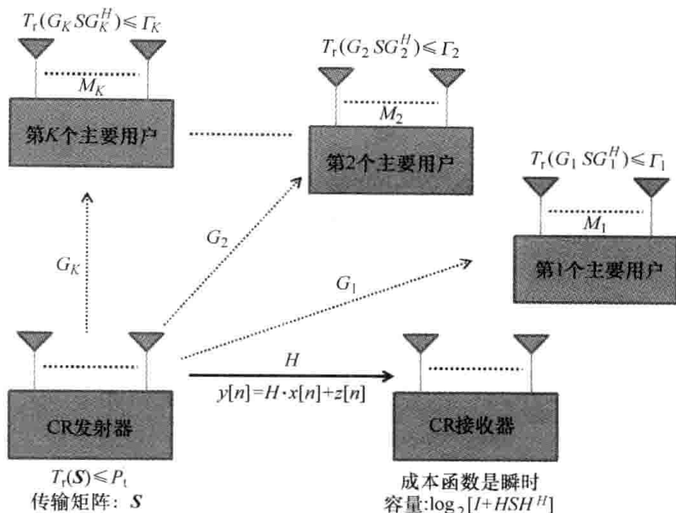


图 2.11　Zhang 和 Liang（2008 年）认为的频谱重叠方法

大的挑战。然而，在覆盖方法中并非如此。在频谱覆盖中，只要频段是空的，CR 就像普通用户一样接入频段。因此，频谱重叠方法所面临的干扰限制约束在这里没有影响。显然，这使得传统的设计方法，如在 Palomar、Cioffi 和 Lagunas（2003 年）的研究中，直接适用于频谱覆盖法。这是频谱覆盖方法研究更侧重于引入合作接入方案而非 MIMO 系统的原因之一。

2.4.2　协同频谱接入

由于 CR 相互配合来检测频谱，它们也可以合作接入频谱。协同频谱接入的思想如图 2.12 所示。

图 2.12 中，一组 CR 合作将首个 CR 的消息中继到基站。由于 CR 网络覆盖广泛的地理区域，每个 CR 经历不同的频谱条件，检测不同的频谱空洞。例如图 2.12 中 CR_1 仅与 PU_1 相邻，利用 f_1 进行传输，因此有可用频段 f_2、f_3、f_4。因此，CR 网络作为一个整体，有很多机会被用于无缝频谱传输。得益于这种设置，Ben Letaief 和 Zhang（2009 年）介绍了认知中继网络和认知 STF（Space - Time - Frequency，空间—时间—频率）编码的概念。接下来，简要地讨论每一个概念。

考虑 CR 网络由一个计划将消息发送到目的节点的源节点和 K 个中继节点组成，可用来帮助这个传输过程。还假设，在很宽的频谱范围内有一组 PU，让每个 CR 属于至少一个 PU 的传输范围。此外，假设 PU 网络正在使用一组 N 个不重叠的频带 f_1，f_2，…，f_N，每个 PU 运行时可以使用全部或部分频段（如同一个基于 OFDMA 的系统）。因此，每个 CR 使用某些感知方法获取在其范围内的可用频带的地图。因此，对于整个

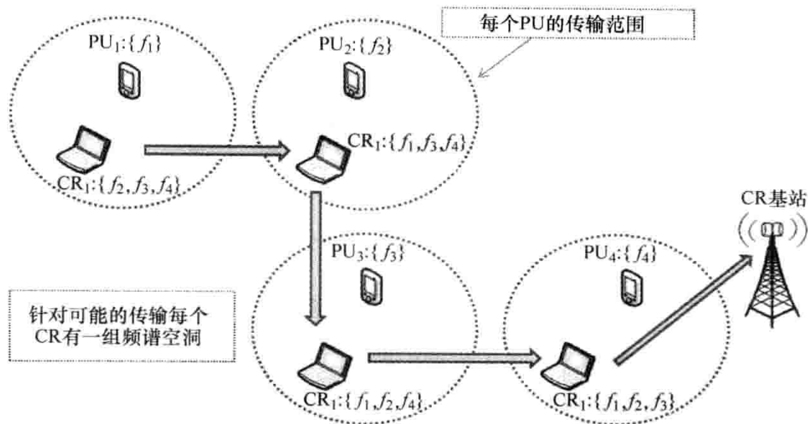


图 2.12 协作 CR 网络

CR 网络，频谱图（矩阵 $\boldsymbol{B}$）的组成为

$$B=\begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k,1} & b_{k,2} & \cdots & b_{k,N} \end{bmatrix}_{K\times N} \tag{2.11}$$

其中 $\{b_{k,n}\}_{k=1,n=1}^{K,K}=\{0,1\}$ 是第 k 个中继节点的第 n 个可用频带的指标。例如，图 2.12 所示设置的频谱图矩阵（$K=N=4$），表示为

$$B=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

注意到对于第 k 个 CR 要使用的频带 $\{f_n\}_{n=1}^{N}$，它必须对第 $\{k-1\}$ 和第 $\{k+1\}$ 个 CR 可用，以避免干扰相邻的 PU。

如果在信源和目标节点之间有一组连续的可用频带，认知中继网络的主要优点是实现无缝传输。然而，Ben Letaief 和 Zhang（2009 年）的研究显示，如果各中继节点在一个时隙接收并接着发送，实现的数据速率将显著降低。事实上，它表明，中继节点的数量越大，实现的数据速率越低。为了克服这种退化，Ben Letaief 和 Zhang（2009 年）提出了认知 STF 编码。

在认知中继网络中，各个中继节点使用至多两个可用频段接收，然后一步将消息转发到目标节点。这样做使得 CR 网络实际上浪费了大部分的可用频带。认知 STF 编码的

目的是通过充分利用网络中每个中继节点的频谱机会克服这个缺点。建议方案的工作原理如下：

1）第一阶段，信源在 N_s 时隙将 N_s 符号组播送到所有中继节点。

2）所有的中继节点对接收到的信号进行解码，并在转发到目标节点之前根据某些编码方案重新编码。

分析表明，只要所有节点都使用所有可用的频率中继消息到目标节点，任何常规的正交 STBC（space - time block coding，空时分组编码）都可以使用。此外，可达到的速率也不依赖于中继节点的数目。

2.5　结论

本章关注 CR 网络的合作动态频谱接入。这一研究领域是新兴的 CR 技术的一个新扩展。它旨在将 MIMO 系统和协同通信的优势引入到 CR 技术中。动态频谱接入是 CR 技术的一项核心任务。许可参数允许 CR 在伺机通信接入之前感知频谱空洞。这是一个两阶段的过程：首先，运用频谱感知方法检测频谱空洞，然后 CR 选择最好的方式利用该空洞传输数据。在本章中，强调利用 MIMO 系统和新兴的协同通信增强动态频谱接入的过程。

参 考 文 献

1. Arslan, H. (Ed.). (2007). *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
2. Ben Letaief, K., and Zhang, W. (2009, May). Cooperative communications for cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE* 97(5), 878–893.
3. Boyd, S., and Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.
4. Cabric, D., Mishra, S.M., and Brodersen, R.W. (2004, November). Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. *Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers.*
5. Cabric, D., Mishra, S.M., Willkomm, D., Brodersen, R.W., and Wolisz, A. (2005, June). A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum. *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit.*
6. Cave, M., Doyle, C., and Webb, W. (2007). *Essentials of Modern Spectrum Management*. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Clancy, T.C. (2007, November). Formalizing the interference temperature model. *Wireless Communications and Mobile Computing* 7(9), 1077–1086.
8. Digham, F., Alouini, M.-S., and Simon, M.K. (2003). On the energy detection of unknown signals over fading channels. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Anchorage, Alaska, pp. 3575–3579.

9. Digham, F., Alouini, M.-S., and Simon, M.K. (2007, January). On energy detection of unknown signals over fading channels. *IEEE Transactions on Communications* 55, 21–24.
10. *Establishment of Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed Mobile And Satellite Frequency Bands*. (2003). Washington, D.C.: Federal Communications Commission (FCC).
11. Fitzek, F.H., and Katz, M.D. (Eds.). (2007). *Cognitive Wireless Networks, Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communications*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
12. Ganesan, G., and Li, Y.G. (2007a, June). Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, Part I: Two user networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6(6), 2204–2213.
13. Ganesan, G., and Li, Y.G. (2007b, June). Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, Part II: Multiuser networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6(6), 2214–2222.
14. Ghasemi, A., and Sousa, E.S. (2005). Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. *Proceedings of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Md., pp. 131–136.
15. Han, N., Shon, S., Chung, J.H., and Kim, J.M. (2006). Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems. *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Phoenix Park, Korea, pp. 1765–1770.
16. Han, Z., Fan, R., and Jiang, H. (2009, June). Replacement of spectrum sensing in cognitive radio. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8(6), 2819–2826.
17. Haykin, S. (2005, February). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23(2), 201–220.
18. Herath, S.P., and Rajatheva, N. (2008). Analysis of equal gain combining in energy detection for cognitive radio over Nakagami channels. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, New Orleans, La., pp. 1–5.
19. Herath, S.P., Rajatheva, N., and Tellambura, C. (2009). Unified approach for energy detection of unknown deterministic signal in cognitive radio over fading channel. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dresden, Germany.
20. Hulbert, A.P. (2005). Spectrum sharing through beacons. *Proceedings of the 16th Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Berlin, Germany, pp. 11–14.
21. Hur, Y., Park, J., Woo, W., Lee, J.S., Lim, K., Lee, C.-H., et al. (2006). WLC05-1: A cognitive radio (CR) system employing a dual-stage spectrum sensing technique: A multi-resolution spectrum sensing (MRSS) and a temporal signature detection (TSD) technique. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, San Francisco, pp. 1–5.
22. Kostylev, V.I. (2002). Energy detection of a signal with random amplitude. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, New York, pp. 1606–1610.
23. Lai, L., V. Fan, and V. Poor. (2008). Quickest detection in cognitive radio: A sequential change detection framework. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, New Orleans, La.

24. Larsson, E.G., and Stoica, P. (2003). *Space-Time Block Coding for Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press.
25. Li, H., Li, C., and Dai, H. (2008). Quickest spectrum sensing in cognitive radio. *Proceedings of the 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Princeton, N.J., pp. 203–208.
26. Lundén, J., Koivunen, V., Huttunen, A., and Poor, H. V. (2009, November). Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies. *IEEE Transactions on Signal Processing* 57(11), 4182–4195.
27. Luo, L., Neihart, N.M., Roy, S., and Allstot, D.J. (2009, June). A two-stage sensing technique for dynamic spectrum access. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8(6), 3028–3037.
28. Ma, J., Li, G., and Juang, B. (2009, May). Signal processing in cognitive radio. *Proceedings of the IEEE* 97(5), 805–823.
29. Mangold, S., Zhong, Z., Challapali, K., and Chou, C.-T. (2004). Spectrum agile radio: Radio resource measurements for opportunistic spectrum usage. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Dallas, pp. 3467–3471.
30. Mishra, S.M., Sahai, A., and Brodersen, R.W. (2006). Cooperative sensing among cognitive radios. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Istanbul, Turkey, pp. 1658–1663.
31. Mitola III, J. (2000). *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. PhD diss., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
32. *Notice of Proposed Rule Making and Order*. (2003). Washington, D.C.: Federal Communications Commission (FCC).
33. Oner, M., and Jondral, F. (2007, April). On the extraction of the channel allocation information in spectrum pooling systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 25(3), 558–565.
34. Palomar, D.P., Cioffi, J.M., and Lagunas, M.A. (2003, September). Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: A unified framework for convex optimization. *IEEE Transactions on Signal Processing* 51(9), 2381–2401.
35. *Principles for Promoting the Efficient Use of Spectrum by Encouraging the Development of Secondary Markets*. (2003). Washington, D.C.: Federal Communications Commission (FCC).
36. Quan, Z., Cui, S., Poor, V.H., and Sayed, A. (2008, November). Collaborative wideband sensing for cognitive radio. *IEEE Signal Processing Magazine* 25(6), 60–73.
37. *Re: Establishment of an Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed, Mobile, and Satellite Frequency Bands*. (2007, May). Washington, D.C.: Federal Communication Commission.
38. Sahai, A., Hoven, N., and Tandra, R. (2004). Some fundamental limits on cognitive radio. *Proceedings of the Allerton Annual Conference on Communication, Control, and Computing*. Monticello, Ill.
39. Sendonaris, A., Erkip, E., and Aazhang, B. (2003a, November). User cooperation diversity—Part I: System description. *IEEE Transactions on Communications* 51(11), 1927–1938.
40. Sendonaris, A., Erkip, E., and Aazhang, B. (2003b, November). User cooperation diversity—Part II: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions on Communications* 51(11), 1939–1948.

41. *Spectrum Policy Task Force Report*. (2002). Washington, D.C.: Federal Communications Commission (FCC).
42. Tang, H. (2005). Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. *Proceedings of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Md., pp. 151–159.
43. Tian, Z., and Giannakis, G.B. (2006). A wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios. *Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM*, Mykonos Island, Greece, pp. 1–5.
44. Wild, B., and Ramchandran, K. (2005). Detecting primary receivers for cognitive radio applications. *Proceedings of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Md., pp. 124–130.
45. Xiao, Y., and Hu, F. (Eds.). (2009). *Cognitive Radio Networks*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
46. Yucek, T., and Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 11(1), 116–130.
47. Zeng, Y., and Liang, Y.-C. (2007). Covariance based signal detection for cognitive radio. *Proceedings of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Dublin, Ireland, pp. 202–207.
48. Zeng, Y., and Liang, Y.-C. (2009, June). Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio. *IEEE Transactions on Communications* 57(6), 1784–1793.
49. Zhang, L., Liang, Y.-C., and Xin, Y. (2008, January). Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 26(1), 38–51.
50. Zhang, R., and Liang, Y.-C. (2008, February). Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 2(1), 88–102.
51. Zhao, Q., and Sadler, B.M. (2007, May). A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine* 24(3), 79–89.

第3章 自适应调制、自适应功率分配和自适应媒介访问

3.1 概述

工作在复杂条件下的WSN的内在要求引入了相当多的约束[1,2]。目前仍然挑战研究界的几个基本问题包括：

1）现实的协议设计：目前许多WSN平台的开发都假设简化无线通信的过程和运行环境[3]。缺乏系统设计的现实模型往往导致解决方案仿真很好但对实际网络却不够强大。需要研究注重开发实际可行的感知环境的更好的模型和新的网络协议。

2）电源管理：由于给传感器节点供电的电池的能力非常有限，网络中的能量是宝贵的资源。大多数应用要求传感器网络具有很长的工作生命周期，这一事实强调了研究提高WSN能量利用效率的重要性[4]。

3）实时操作：WSN具有高度的时间约束。在许多应用中，感知信息需要在很短的时间帧内收集，以使数据采集有效且准确。然而，当前的大多数协议都不能很好地满足实时操作的要求。这就要求需要设计可以充分减少时延的实时操作协议[5]。

4）安全和隐私问题：传感器节点一般部署在面积大且易访问的地方。未加密的信息在传输过程中可能会被拦截。为了确保系统的隐私，必须考虑每一个组件的安全问题并妥善处理。

尽管如此，由于在灵活性、成本效益、高分辨率、合作的努力和自组织能力方面具有许多吸引人的特点，WSN越来越受欢迎[1,4,6]。虽然每个节点只有数量有限的处理能力，但一大群传感器节点的协同可以组成一个WSN，能够非常详细地感知周围环境[7]。

本章的主要结论最初来源于参考文献［65］和［66］，现归纳如下：

1）为节能评估不同的链路自适应策略。此分析的目的是在达到最佳的频谱效率的同时最大限度地减少网络中的能耗，从而延长网络的工作生命周期，同时满足QoS的要求。Goldsmith等[8]的工作被扩展到计算网络中的能量性能，这里全部可用的能量约束施加于通信路径中的所有节点上。研究了决定网络中能耗的两个关键因素：数据传输速率和发射功率。

2）为最大限度地减少能耗和提高网络生命周期，一种ASAM（Adaptive Sleep with Adaptive Modulation，带自适应调制的自适应睡眠）被用于自适应地调整无线信道节点操作进程的持续时间。为不同的媒体访问控制（MAC）层协议，推导了计算能耗的相关公式。计算并比较了AM（Adaptive Modulation，自适应调制）、AMI（Adaptive Modulation with Idle mode，空闲模式的自适应调制）和ASAM算法的能耗。

3）引入自适应功率控制和分配算法，分别分析单跳和多跳通信达到的整体速度和功率水平。也推导了最佳的功率控制和分配因子。使用不同的自适应传输协议探索一个两链路多跳网络的例子。

本章安排如下：3.2 节为这项工作提供必要的背景和分析框架。描述相关的参数和系统模型。3.3 节介绍链路自适应和反馈通信系统的文献回顾。回顾节能协议的最近研究和设计。解释不同的自适应技术的基本原理。3.4 节描述 ASAM 算法和自适应功率分配策略。3.5 节介绍仿真结果。深入研究信道条件、业务强度和调制阶段数量的影响。评估并讨论使用链路自适应策略和 ASAM 的点至点通信和多跳网络的每个节点的工作生命周期。

3.2 系统模型

本节中，我们重点关注 PHY 的信道特性。图 3.1 显示了有趣的无线通信系统和主要部件的体系结构。

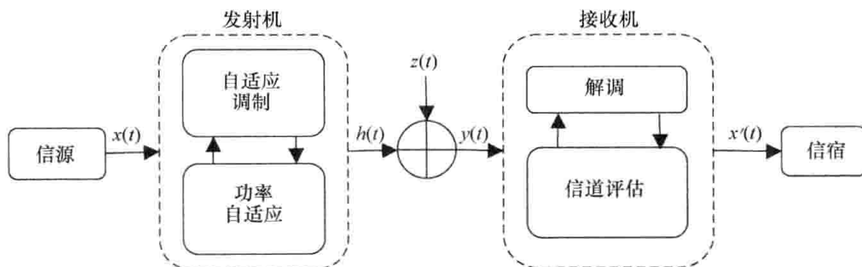


图 3.1 一个典型的无线通信系统的系统架构

3.2.1 信源和信宿

通信信息数据 $x(t)$ 由信源单元产生。为了减少在实践中实现的复杂性，假设数据是均匀分布的，并且都是以固定的符号率产生（有关详细信息，请参见第 3.3.5 节）。通信系统的带宽用 B 表示，固定的符号率用 R_s 表示。数据通过一个平坦衰落的无线信道发送，在此过程中加入 AWGN。

3.2.2 发射机

模型中的发射机有三个主要任务：

1）发送：发射机通过无线信道根据所选择的调制方式和功率水平发送数据到接收机。

2）自适应调制：不同于传统的调制器，这里的调制方案是不固定的，根据 QoS 准则变化。在这一部分，进一步强调瞬时 BER（误码率）的要求。因此，数据传输速率和传输持续时间由不同的调制方案决定，而这反过来又根据性能要求选择。

3）功率自适应：选择最适合的 PAP（Power Adaptation Policy，功率自适应策略）以根据从接收机反馈的 CSI（Channel State Information，信道状态信息）优化功率水平。本章考虑了两种功率自适应技术，即功率分配和自适应睡眠，这两种技术都在 3.4 节中详细讨论。

3.2.3　接收机

接收机负责接收数据，解调接收到的信息，评估无线信道之后的 CSI。因此，还需要一个反馈信道，这样估计的 CSI 可以反馈回发射机。通常情况下，在这个反馈过程中可能有对发射机决策产生消极影响的估计误差和时延。然而，这里假设接收机的信道估计是完美的，反馈信道的时延是可以忽略的。

3.2.4　无线信道

在传输、接收和信号传播的过程中，应在分析中考虑加性噪声。考虑信道增益和加性噪声，输出信号可以表示为

$$y = h \cdot x + z \tag{3.1}$$

式中　x——输入信号；

h——信道增益；

z——AWGN，这里取一个 PSD（Power Spectral Density，功率谱密度）为 $N_0/2$ 的零均值的白高斯随机变量。

3.2.5　对数正态分布阴影信道模型

无线连接经历了阴影和衰落的影响。在本节中，信道的阴影效应建模为对数正态分布，描述链路预算中计算的随机阴影效应。接收到的功率水平通过考虑对数正态分布的路径损耗来阐明。使用这种近似，一个简单的路径损耗模型可以表示为[9]

$$P_r = P_0 - 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \tag{3.2}$$

式中　P_r——接收到的功率；

P_0——距离发射机参考距离 d_0 处接收到的功率；

d——发射机和接收机之间的距离；

X_σ——一个零均值标准偏差 σ 的高斯分布的随机变量；

n——依赖于传播环境的路径损耗指数。对常见的无线传感器环境，n 的典型取值范围为［2，5］[10]。

3.2.6　莱斯衰落信道模型

这里多径衰落效应建模为莱斯分布。

当分析无线信道的衰落概率分布时，莱斯的 PDF 通常表示成接收信号的 SNR（γ）的函数[10]：

$$P_r(\gamma) = \frac{(1+K)}{\bar{\gamma}} e^{\left(-K - \frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right)} I_0\left(\sqrt[2]{\frac{K(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right),\ \gamma \geqslant 0 \tag{3.3}$$

式中 I_0——第一类 0 阶的修正贝塞尔函数；

K——莱斯 K 因子，定义为占主导地位的分量信号功率与本地平均散落功率的比值。换言之，K 因子表示信道中 LOS（Line - Of - Sight，视距）信号的强度[11]。

这里，链路是不相关的，这样一个链路上的遮蔽和衰落效应不会影响到其他链路。因此，信道莱斯 K 因子随每一个链路的变化是独立的。

3.3 自适应传输和反馈通信系统

3.3.1 概述

根据时变信道的特性[15]，自适应调制（AM）或链路自适应允许通信系统的动态调整（例如，通过改变调制[12]和编码方案[13]及其他参数[14]）。通过修正特定通信条件下的传输参数，有效地提高了频谱效率。

自适应发送隐含的基本概念是通过改变发射功率、数据速率、编码速率、编码方案或它们的组合，维持一个稳定的 E_b/N_0 水平。通过高速数据传输利用有利的信道条件。这样，频谱效率提高的同时维持了 BER 的要求[15]。

3.3.2 自适应系统设计

图 3.2 展示了一个典型的自适应反馈系统模型。与传统的通信系统不同，自适应系统的调制水平和发送功率是不固定的，受发射机的动态控制。通过反馈信道，发射机与接收机交流信息并收集当前的 CSI 数据。然后发射机决定要使用的适当的传输参数。在这个过程中，自适应调制控制和功率自适应单元同步工作，以确保能准确地选择调制方式和发送功率。

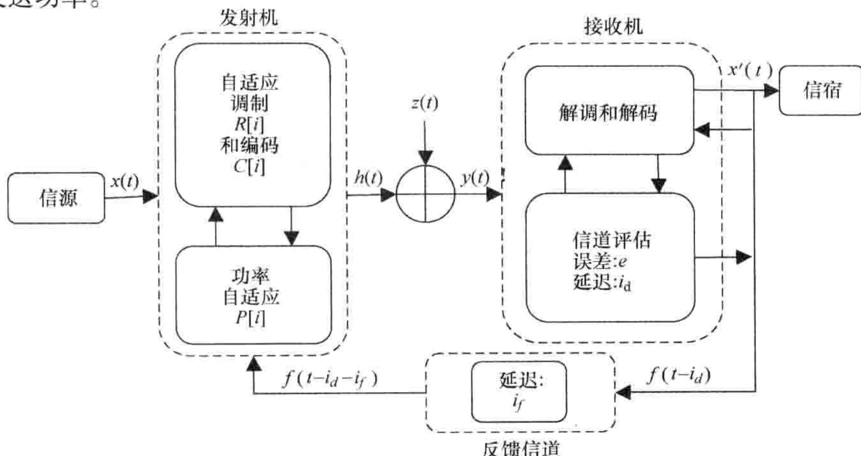


图 3.2 自适应反馈系统模型

接收机具有两个功能：解调和评估。它与发射机协作确定发送的信息，并估算CSI。在估算和反馈的过程中，可能会出现时延和错误，削弱评估的准确性。

3.3.3 链路自适应

调整的参数包括符号率[16]、调制方案或星座大小、发送功率[17]、数据传输速率[12,18-20]和编码参数[21-24]。这些参数可以根据不同的应用和性能要求单独或联合调整。最近的研究专注于调整一个或两个参数，特别是功率和/或速率[15,16,20,19,25]，速率和编码[13,21]以及 BER[21]。

Goldsmith 等[20]的研究显示，通过同时改变数据速率和传输功率，可以最好地实现平坦衰落信道的香农容量。此外，由于数据速率和发射功率是计算网络能量的两个参数，在分析网络能耗时，自适应的可变速率/可变功率成为研究中最有趣的链路自适应策略。在本节中，分别和同时使用可变速率和可变功率来评估链路自适应系统的性能。目标是解决能量优化问题，以便在网络约束下实现节点生命周期最大化。

Cavers[16]和 Hayes[17]在 20 世纪 60 年代进行了自适应技术的早期研究。结果表明：对于自适应技术，根据链路质量，通过支持各种通信公司和多种传输速率以提高系统效率和吞吐量是很有希望的。然而，由于硬件限制，难以准确地估计 CSI，链路自适应在当时被认为是不可行的[8]。随着技术的进步，特别是在硬件中，原来对于链路自适应的关注已经变得不那么令人望而却步了。无线局域网（WLAN）加入 AM 的技术[26-29]、MIMO 通信技术[30]和 3G/4G 蜂窝网络技术已经复苏[25,31-34]。

必须注意的是，自适应系统的设计要确保满足稳定通信的要求。即使在深衰落的情况下，链路自适应协议仍能避免信道利用率差。因此，链路自适应通过基于信道条件以所需的速度传输提高了频谱效率。特别是对于多跳中继网络，通信链路可以以不同的数据速率和功率水平传输，以达到最佳的频谱效率和最小的能耗。

然而，链路自适应仍然遭受一些实际的限制[35]。首先，它高度依赖于可靠的接收机和反馈渠道以便估算并传送准确的 CSI 到发射机。此外，通信过程需要实时估计和无差错传输，以确保发射机决策的准确性。如果不能正确或及时地接收随时间变化的 CSI，链路自适应是不可能的。此外，大多数的链路自适应技术，主要根据模拟来评估，迫切需要现实网络中的实际实验。

3.3.4 能量受限网络的链路自适应

在能量受限的传感器网络中应用链路自适应的研究已经得到了相当多的关注[36,38-40]。许多设计通过在传感器节点中使用附加的低功耗组件提供最佳的能量性能[37,41-42]。然而，附加的硬件会引入噪声和错误到网络中，并影响系统的效能[35]。有些研究也考虑使用动态路由协议提供从信源到目标节点的信息[43-45]。设计往往侧重于为传输线路沿线的所有节点平衡电池电量。

能量受限的传感器网络领域的最新研究还提出了能量感知协议的概念，以便在传输过程中控制功率水平[46-49,64]。发射功率动态分配，而不是预先固定。能量感知协议通

过自适应变化平衡链路预算，从而使每个传输在给定的信道条件下消耗不同数量的能量[17]。因此，不需要浪费功率或牺牲 BER，协议通过自适应利用平坦衰落的优势提供高均值的链路能量效率。在这个过程中没有能量被浪费掉，因此最大化了节点生命周期。

能量感知协议的基本思路之一是当节点没有执行任何任务时使其断电。这是由于 WSN 中节点通常只需要很短的一段时间进行通信的事实，因此，网络的拓扑结构通常存在高的冗余度[30]。设计无线通信协议，通过让节点休眠最大的时间量使能耗减到最小是可能的。因此，已提出了 AS（Adaptive Sleep，自适应睡眠）技术，这样在当前的衰落条件下可以调整节点的睡眠时间。没有通信发生的大部分时间中，节点断电并工作在最小功率水平。备用电源的数量级可以低于有效功率。由于网络中的睡眠时间最大化，从而提高了能量效率。

3.3.5 自适应技术

动态地调整传输参数导致了各种自适应技术的出现。本章通过考虑数据速率和发射功率探讨网络能耗。对于一个给定的 BER 约束，频谱效率需要进行优化，这适用于所有的自适应技术。在下面的章节中提出不同链路自适应策略的近似值和公式。

1. 多正交幅度调制的 BER 逼近

从 AM 分析得到的主要好处是频谱效率。它被定义为每单位带宽的平均数据速率（R/B）。传输速率由调制方案决定，即 $r(\gamma)=\log_2[M(\gamma)]$（比特/字符）[8]。因此，分别给出连续速率自适应［方程（3.4）］和离散速率自适应［方程（3.5）］的频谱效率[8]：

$$\frac{R}{B}=\int_0^{\infty}V(\gamma)p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma \tag{3.4}$$

$$\frac{R}{B}=\sum_{i=0}^{N-1}r_i\int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}}p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma \tag{3.5}$$

自适应速率 $r(\gamma)$ 由调制方案决定，通常受平均发送功率 $\overline{P}$ 的限制。假设发送功率约束为

$$\int_0^{\infty}P(\gamma)p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma\leqslant\overline{P} \tag{3.6}$$

由于灰色位映射，系统 MQAM（Multiple Quadrature Amplitude Modulation，多正交幅度调制）的 BER 表达式可以近似为接收机 SNR 的函数

$$\gamma\left(\frac{P(\gamma)}{\overline{P}}\right)$$

星座图大小 M[8] 为

$$\mathrm{BER}_{\mathrm{MQAM}}(\gamma)\approx\frac{2}{\log_2 M}\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)\times\mathrm{erfc}\left(\sqrt{1.5\,\frac{\gamma\dfrac{P(\gamma)}{\overline{P}}}{M-1}}\right) \tag{3.7}$$

由于这个表达式无法很容易地求解功率 $P(\gamma)$ 和速率 $R=\log_2 M$，当星座大小 $M\geqslant 2$ 且 BER 小于 10^{-3}时，可以被认为是下面公式的严格近似[8]：

$$\mathrm{BER}_{\mathrm{MQAM}}(\gamma)\leqslant 0.2\exp\left(\frac{-1.5\gamma\dfrac{P(\gamma)}{\overline{P}}}{M-1}\right) \tag{3.8}$$

本章对网络生命周期的分析中利用了这种速率变化和功率自适应的严格近似。

2. 变化的速率

考虑到数据传输速率随着信道增益而改变，网络可以通过下列两种方式实现最佳的传输速率：固定符号速率并使用多个调制方案或星座大小，或者固定调制方式并改变符号速率。一般来说，后者是难以实现的，因为改变符号速率，需要改变信号带宽，这在实践中是很复杂的[23]。与之相反，改变调制类型或星座大小更为可行。出于这个原因，它被用于本章中，即改变调制方式以达到传输过程中的最佳速率。

为了说明可变速率调制问题，考虑固定符号率为 T_s 的 MQAM 信号簇，用 M 表示调制方案的星座大小，$\overline{P}$ 表示平均发射功率，N_0 和 B 分别为噪声和带宽。假设每个星座图和单位平均信道增益为理想的奈奎斯特脉冲，平均接收 SNR 可表示为[8]

$$\overline{\gamma}=\frac{\overline{P}T_s}{N_0}=\frac{\overline{P}}{N_0B}=\frac{E_s}{N_0} \tag{3.9}$$

回顾上面频谱效率的定义为每单位带宽的数据速率 R/B。对于一个固定的 M，就变成 $R/B=(\log_2 M)/B$ 比特/符号。在这种情况下，只考虑速率变化。频谱效率因此用平均发射功率和 BER 参数表示。根据 M 重新整理式（3.9），获得用接收到的 SNR γ 的函数表示的星座大小，即

$$M(\gamma)=1+\frac{-1.5\gamma}{\ln(5\mathrm{BER})}\frac{P(\gamma)}{\overline{P}} \tag{3.10}$$

连续和离散的速率自适应的符号率和接收的 SNR 之间的关系如图 3.3 所示。关于式（3.6）中的功率限制，频谱效率通过最大化优化为

$$E[r(\gamma)]=E[\log_2(M(\gamma))]=\int\log_2\left(1+\frac{-1.5\gamma}{\ln(5\mathrm{BER})}\frac{P(\gamma)}{\overline{P}}\right)p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma \tag{3.11}$$

3. 变化的功率

可以改变发射功率以补偿信噪比。目标是保持一个固定的误码率，等同于恒定的接收 SNR。参考文献［8］中提出了速率固定功率变化自适应的两种技术：信道反转自适应和截断信道反转。尽管这两种技术都旨在保持恒定的接收 SNR，由于大多数的平均信号功率被用来补偿深衰落，前者付出了较大的功率代价，而后者则提供一个低于无信号发送的截止电平。信道反转的功率自适应公式中 σ 是恒定的接收 SNR，γ 是信道增益。

$$\frac{P(\gamma)}{\overline{P}}=\frac{\sigma}{\gamma} \tag{3.12}$$

使用这种功率自适应策略，将方程（3.12）代入式（3.11）得到频谱效率为

$$\frac{R}{B}=\log_2\left(1+\frac{-1.5\gamma}{\ln(5\mathrm{BER})E[1/\gamma]}\right) \tag{3.13}$$

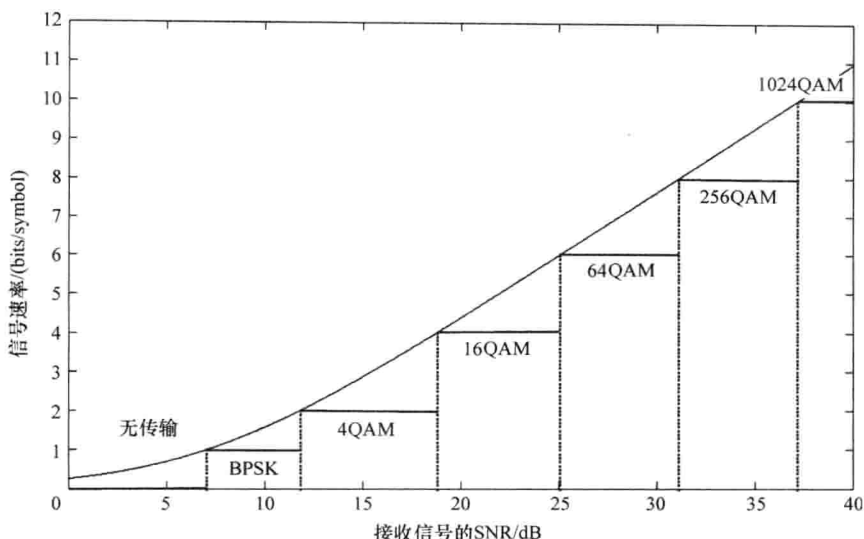


图 3.3 当 BER = 10^{-4}时使用自适应调制的符号速率验证

当功率自适应使用截断信道反转时，衰落可以反过来高于给定的截止 γ_0。功率自适应为[8]

$$\frac{P(\gamma)}{\overline{P}}=\begin{cases}\dfrac{\sigma}{\gamma} & \gamma\geqslant\gamma_0\\ 0 & \gamma<\gamma_0\end{cases} \tag{3.14}$$

同样的，截断信道反转的频谱效率由下式给出：

$$\frac{R}{B}=\max_{\gamma 0}\log_2\left(1+\frac{-1.5\gamma}{\ln(5\mathrm{BER})E_{\gamma 0}[1/\gamma]}\right) \tag{3.15}$$

对于一个成功的传输，通过引入功率控制技术来确定所需的功率级别，根据 $P(\gamma)/\overline{P}$ 重新整理方程（3.10）得到功率控制值的公式。然后得到归一化功率控制因子为

$$\frac{P(\gamma)}{\overline{P}}=\frac{\ln(5\mathrm{BER})\times(M-1)}{-1.5\gamma} \tag{3.16}$$

对于每一个接收到的 SNR 值，瞬时功率值 $P(\gamma)$ 可以由功率控制因子 $P(\gamma)/\overline{P}$ 与平均功率 $\overline{P}$ 相乘来计算。因此，瞬时功率电平可以根据信道条件而变化，而不是总是使用固定的平均发射功率。图 3.4 显示了与接收到的信噪比相关的功率控制因子。正如图中所示，对于相同的调制方案，功率电平随着信噪比的增加而减少。只有当发射机从较低向较高的调制等级转换时，功率才会显著增大。

4. MQAM 调制方案的速率和功率自适应

通过速率自适应和可变功率技术的结合，能够进一步提高频谱效率。最优的频谱效率由四种情况决定：连续的速率自适应与平均的 BER 约束（C - Rate A - BER），连续

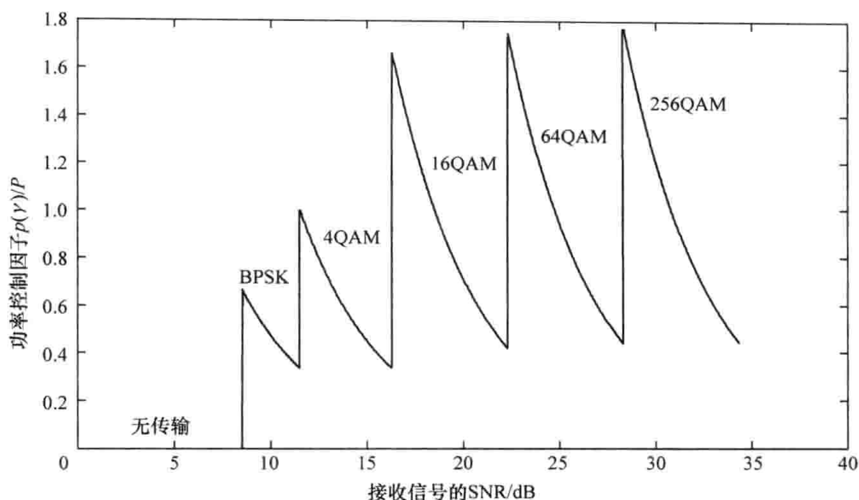


图 3.4　MQAM 归一化的功率分配

的速率自适应与瞬时的 BER 约束（C - Rate I - BER），离散的速率自适应与平均的 BER 约束（D - Rate A - BER），以及离散的速率自适应与瞬时的 BER 约束（D - Rate I - BER）[18]。

本节中，利用离散速率连续功率自适应（有关详细信息，请参见第 3.4.2 节）与平均功率和平均误码率的约束最大限度地提高频谱效率。这变成了一个可以运用拉格朗日方法解决的约束优化问题。求解功率和 BER 约束优化问题的通用的拉格朗日方程由下式给出：

$$f_{\text{opt}} = f_r(\gamma) + \lambda_1 \sum_{i=1}^{n} \text{BER}_i(\gamma) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{m} P_i(\gamma) \tag{3.17}$$

式中　f_r——能量函数；

BER_i——瞬时误码率约束；

P_i——对于每个信噪比值约束的平均发射功率。

最佳的速率和功率可以通过求解下面的公式来满足：

$$\frac{\partial f_{\text{opt}}}{\partial r(\gamma)} = 0 \text{ 且} \frac{\partial f_{\text{opt}}}{\partial P(\gamma)} = 0 \tag{3.18a}$$

式中　$r(\gamma)$，$P(\gamma)$——分别是速率和功率。对于所有的 SNRγ，两者都是非负的。

3.4　多跳中继网络和能量约束网络分析

3.4.1　采用自适应技术的能耗

能耗的通式可以表示为

$$E = P \times T \tag{3.18b}$$

式中 P——功率水平；

T——由数据传输速率的倒数确定的传输时间，即 $T = 1/R$。

因此，能耗也取决于通信数据速率。

在本节中，考虑传感器节点不同功率等级的四种操作模式：

1）传输模式：数据包从一个节点传输到另一个节点。传输模式中无线电发射机和 CPU（Central Processing Unit，中央处理单元）都是活跃的。该装置能够激活处理器，监听信道，等待接收和发送数据。与其他模式相比，传输模式需要最高的功率电平。

2）活跃模式：节点是醒着的并等待接收数据包。在这种模式下，CPU 保持高的功能性的同时传输是关闭的。现在的电流消耗被称为"运行电流"，它支持 CPU 的高活跃性。主动模式的能耗比传输模式少。

3）空闲模式：这时 CPU 保持低活跃性。无线电传输是关闭的。因此，这种模式下的电流消耗比传输和活跃模式都低，但高于睡眠模式。

4）睡眠模式：数据成功交付后，节点就进入休眠状态。大多数节点组件断电并被置于备用状态，以节省能量。再次唤醒发射机和 CPU 时，只需要一个时钟信号。这种模式下的功率消耗是四种模式中最低的。

每一个阶段的能耗取决于它的功率电平和工作持续时间。本节考虑四种不同工作阶段的能耗，研究通信过程中单节点的生命周期，分析单跳网络的点对点通信的链路自适应技术。此外，也推导了多跳中继网络的自适应功率分配因子。

3.4.2 单跳离散速率连续功率自适应

首先研究单跳网络的情形，信源直接发送数据到目标节点。这里，考虑带瞬时 BER 自适应的离散速率连续功率自适应[35]。对于一个给定的离散速率 $\{r_i\}_{i=1}^{N} = \log_2(M_i)$，每个速率在该区域保持不变 $[\gamma_i, \gamma_{i+1}]$，其中 $i = 1, 2, \cdots, N-1$。根据式（3.15）和式（3.16），最优的功率自适应被表示为[8]

$$\frac{P(\gamma)}{\bar{P}} = \frac{h(r_i)}{\gamma} \tag{3.19}$$

式中

$$h(r_i) = \frac{\ln(5\mathrm{BER})}{-1.5} \times (M_i - 1)$$

这种情况下

$$\mathrm{BER}(\gamma) = \overline{\mathrm{BER}}$$

通过拉格朗日优化方法可以得出最佳的速率区域边界。离散速率连续功率协议的拉格朗日方程是[18]

$$J(\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_N) = \sum_{0 \leqslant i \leqslant N-1} r_i \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma + \lambda\Big[\sum_{0 \leqslant i \leqslant N-1} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} \frac{h(r_i)}{\gamma} p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma - 1\Big] \tag{3.20}$$

求解方程

$$\frac{\partial J}{\partial r_i}=0,\ 0\leqslant i\leqslant N-1 \tag{3.21}$$

因此，可以得出最佳功率的 SNR 阈值为

$$\gamma_i=\frac{h(r_0)}{r_0}\rho \tag{3.22}$$

和

$$\gamma_i=\frac{h(r_i)-h(r_{i-1})}{r_i-r_{i-1}}\rho,0\leqslant i\leqslant N-1 \tag{3.23}$$

式中　ρ——一个取决于式（3.6）中平均功率约束的恒定值。

在离散速率模式下解释这个方程，平均功率取决于

$$\sum_{0\leqslant i\leqslant N-1}\int_{r_i}^{r_{i+1}}\frac{h(r_i)}{\gamma}p(\gamma)\mathrm{d}\gamma=1 \tag{3.24}$$

由于源节点直接发送数据到目标节点，网络中的能耗可以通过节点生命周期进行量化。节点的生命周期，反过来，被定义为节点有足够能量发送信息到目标节点的时段。单跳离散速率连续功率自适应的目标，是基于由式（3.22）～式（3.24）得出的离散速率阈值，根据信道条件，通过自适应地改变传输速率和功率电平，实现节点生命周期的最大化。

3.4.3　多跳中继网络

上一节讨论了单跳 WSN 的节点生命周期。然而，一个典型的 WSN 系统通常由多个节点组成。这些节点相互通信并形成一个多跳网络。在这种情况下，关注整个网络的生命周期，而不是单个节点的生命周期。

特别关注两种类型的多跳网络：①中继网络，信源经由中继节点传输数据到目标节点；②多重链路网络，由几个独立的信源和信宿形成的多个无线通信链路。在这两种情况下，无线信道很容易受彼此的影响。结果，链路之间的阴影效应通常是相关联的。这种现象导致在多跳关联阴影方面产生新的研究方向。最近的研究考虑了此类关联效应，并提出了更切合实际的信道模型[50,51]。然而，本节中考虑一个简化模型，其中链路是独立的，没有关联阴影效应。

1. 多跳中继网络的链路自适应

在同一个 WSN 中，不同的通信链路通常面临不同的信道条件[52]。这是因为无线链路是由随机分布在环境中的传感器节点组成的，信道衰落往往随时间、地域位置和无线电频率而变化。图 3.5 所示是一个多跳中继网络模型的例子。图中的源节点和目的节点分别位于坏的和好的信道条件中，几个中继节点分布于不同的信道条件。考虑节能路由协议，信息经由选择的中继转发到目标节点[53]。在这种情况下，我们重点关注双链路中继网络的链路自适应行为分析。

这个双链路中继网络的简化模型如图 3.6 所示。该模型中，信源、中继节点和目的节点形成两个无线信道。相同的数据包通过两个通信链路分发。然而，源节点和中继节

点的发射机对采取的调制类型和功率电平分别独立做出决定。网络受到总的可用能量的限制。尽管能量的总量是固定的，分配给每个节点的必要的发射功率自适应地进行调整，以实现最小的网络能耗。

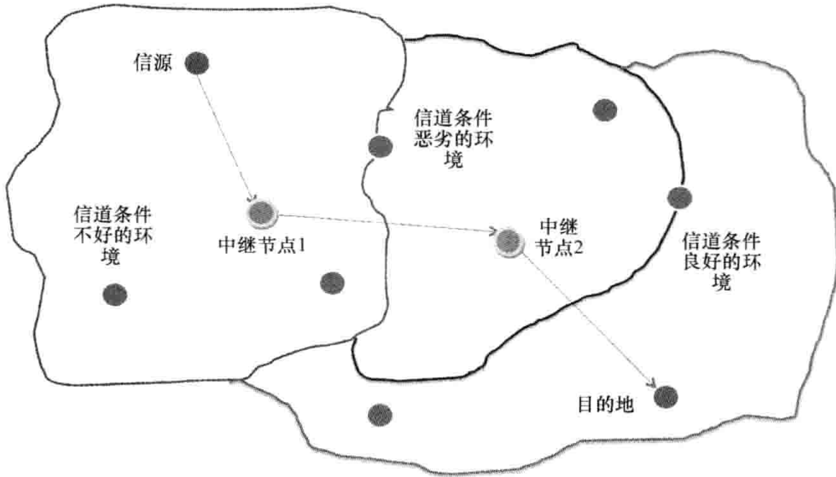


图 3.5 多跳中继网络的例子

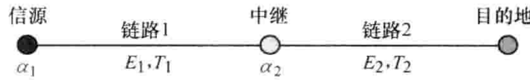


图 3.6 双链路中继网络模型

引入功率分配因子 α，定义为分配给该节点的平均功率占总数的百分比，因此，α 必须满足 $0<\alpha<1$。扩展式（3.20）并考虑离散速率连续输出功率自适应的场景，优化问题可以解释为

$$J(\gamma_1,\gamma_2,\cdots,\gamma_N) = \sum_{0\leqslant i\leqslant N-1} r_i\int_{r_i}^{r_{i+1}} p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma + \lambda\left[\sum_{0\leqslant i\leqslant N-1}\int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{h(r_i)}{\gamma}p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma - \alpha\right] \tag{3.25}$$

使用由式（3.21）~式（3.23）所描述的本质相同的方法，可以获得最佳的速率和功率区域边界。在方程（3.24）中代入新的参数 α，传输功率约束变为

$$\sum_{0\leqslant i\leqslant N-1}\int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{h(r_i)}{\gamma}p(\gamma)\,\mathrm{d}\gamma = \alpha \tag{3.26}$$

在图 3.6 所示的双链路中继网络中，总能量在源节点和中继节点之间分配。分别用 α_1 和 α_2 表示它们的功率分配因子，α_1 和 α_2 都满足网络中的能量约束，也就是

$$0<\alpha_1<1, 0<\alpha_2<1 \tag{3.27}$$

$$\alpha_1+\alpha_2=1 \tag{3.28}$$

链路 1 和链路 2 的能耗表示为 E_1 和 E_2，链路生命周期分别表示为 T_1 和 T_2。此外，假设分配给任一节点的能量耗尽时，就认为整个网络“失效”并达到其生命周期的极

限。定义网络的生命周期为两个节点都是活跃的并能够传输数据的时间段，也就是说，网络的生命周期 = min（链路 1 的生命周期，链路 2 的生命周期）。最优的网络生命周期 T^* 表示为

$$T^* = \max_{\alpha^*}(\min(T_1, T_2)) \tag{3.29}$$

式中　α^*——网络生命周期最大化时包含两个链路功率分配因子的最优功率分配向量。

考虑到能耗，也可以通过计算整个网络服从最优功率分配时最小的能耗，用公式表示该问题为

$$E = \min_{\alpha^*}(\max(E_1, E_2)) \tag{3.30}$$

因此，通过求解最优的网络能耗问题，最优功率分配因子就确定了。

2. 多链路网络中的链路自适应

当网络中有多个源节点和目的节点时，节点之间的数据传输就建立起多条通信链路。这就是所谓的多链路网络。图 3.7 所示为网络中随机分布有 5 个源节点和 5 个目的节点的五链路的例子。每个源节点只能与它自己的目的节点进行通信，所有的链路都独立运作。因此，各个链路的能耗可以单独考虑。对于不同的信道衰落条件，节点成功传送数据包会消耗不同数量的能量。当一个源节点耗尽了其电池能量时，就不再能够传输信息，这个特定路径的连通性就丢失了。网络生命周期与活跃节点的数量相关。

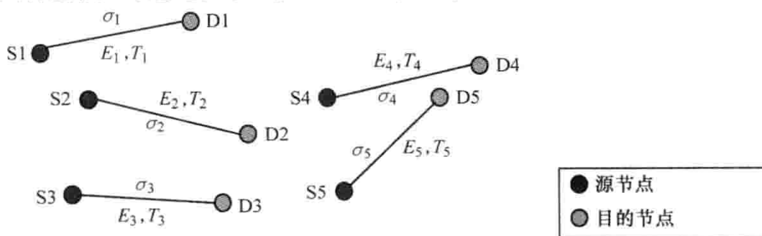


图 3.7　多数据源和目标节点网络模型的例子

3.4.4 MAC 层的自适应调制和自适应睡眠

本节探讨 MAC 层[54-57]的一些协议，涉及自适应调制和自适应睡眠。

图 3.8 显示传输过程完成且不需要进一步行动时总的体系持续时间，它可以分割成实际的数据传输时间（图中标记为 Tx）和活跃/空闲时间。在两个连续的传输之间，节点可以转为睡眠状态。

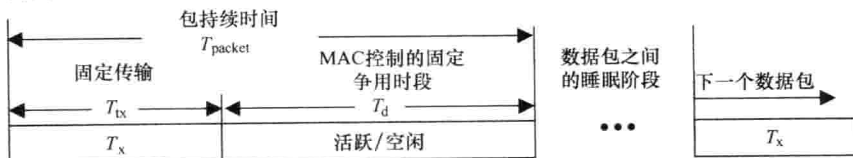


图 3.8　MAC 协议的数据包持续时间

注意到活跃/空闲阶段是MAC层预先分配的争用时段，它确保前一个传输在下一个传输发生之前完成。在争用时段，根据不同的CPU功能，节点可以运转于高CPU活跃性的活跃阶段，也可以处于低CPU活跃性的空闲阶段。显然，活跃阶段比空闲阶段需要更高的功率电平，但由于活跃阶段的无线传输是关闭的，与传输阶段相比，功率电平小得多。在WSN中，节点发送ACK（Acknowledgment，确认）包如空闲信道信息、CTS（Clear To Send，清除发送）和RTS（Request To Send，请求发送）以指示信道状态。基于不同的ACK，节点以相应的行动做出响应。然而，这些行动也需要时间处理，从而产生时延，有时会产生碰撞。从这个意义上说，争用时段为信道发送先前的数据包并准备下一个发送提供了额外的空间。在固定的争用时段之后，节点进入睡眠阶段，等待下一次发送。

另外，睡眠阶段是传输之间的间隙。它也被称为“休眠模式”，在此期间，节点的所有组件都不工作。由于WSN中的节点不需要一直运转，它们在争用时段完成之后可以断电，从而使能耗最小化。取决于数据传输的频度，睡眠时间可能占整体通信时间的很大一部分，因此，节约的能量是相当可观的。

考虑一个基本的MAC协议，其中对于一个给定的传输，信道占用时间是固定的。该协议还预先分配节点传输以及活跃和空闲阶段的持续时间，没有考虑能量自适应。如图3.8所示，每当节点检测到有等待被发送的数据包时，该协议就唤醒节点，设置传输、活跃和睡眠阶段（固定）的持续时间。

另外，自适应调制技术根据信道条件动态地改变数据速率。这改变了传输时间，通常小于预分配的值，从而减少了传输阶段的能耗量。为了进一步优化能耗，网络可以考虑引入传感器节点互通的能量感知协议，也被称为MAC的自适应睡眠[58]。自适应睡眠技术最近已研究用于提高WSN的能量效率。它使用MAC协议设置争用时段的占空比，并根据CSI自适应地调整睡眠时间。因此，它可以在争用时段之后停留在睡眠阶段直到下一个数据包准备好发送，而不是停留在活跃或空闲阶段。

在下面的章节中，解释了自适应调制（AM）、空闲模式的自适应调制（AMI）、带自适应调制模式的自适应睡眠（ASAM）的工作阶段。总能量（E_t）定义为每个节点可用的电池能量。

通信过程会消耗能量，根据不同的工作阶段，消耗的总能量（E_c）由传输能量（E_{tx}）、活跃期能量（E_{active}）和空闲期能量（E_{idle}）组成。睡眠期的能量（E_{sleep}）也在这个过程加以考虑。为了公平地比较三种算法的能耗，睡眠期的能量水平和数据包之间的时隙被认为是相同的。然而，睡眠持续时间取决于网络中的业务强度。贡献给一个数据包的时间（T_{packet}）和争用时段的占空比（T_d）是由MAC层的协议预先确定的。

1. 自适应调制模式的能耗

结合AM技术与MAC层协议，传输时间可以通过自适应调制方案动态地调整。正如第3.4.1节中提到的，能耗是功率电平和传输时间的乘积。因此，传输时间越短，在这个过程中使用的能量越少。AM允许数据根据信道条件以不同的速率发送。它自适应地改变调制星座大小，从而改变速率和传输时间。因此，实际传输过程的持续时间并不

一定覆盖整个传输时间（如图 3.8 所示的 T_{tx}）。

正如图 3.9 所示，该节点在传输之后首先转到具有较低功率电平的活跃阶段，然后进入空闲阶段，这与其他两个阶段相比进一步降低了功率电平。注意到传输时间是由 AM 控制的，而节点空闲时间仍然由 MAC 层协议控制。计算整体的能耗要考虑网络中三种类型的能量支出：

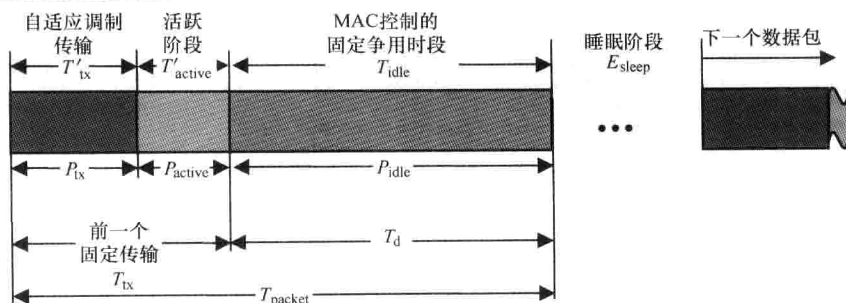


图 3.9　自适应调制模式的能耗

$$
\begin{aligned}
E_c^{AM} &= E'_{tx} + E'_{active} + E_{idle} \\
&= P_{tx} \times T'_{tx} + P_{active} \times T'_{active} + P_{idle} \times T_{idle} \\
&= P_{tx} \times \frac{l}{R} \times P_{active} \times \left(T_{packet} - \frac{l}{R} - T_d\right) + P_{idle} \times T_d
\end{aligned} \tag{3.31}
$$

式中　P_{tx}——发送功率；

$T'_{tx} = \frac{l}{R}$——自适应传输时间；

l——数据包长度；

R——AM 速率；

$E'_{tx} = P_{tx} \times T'_{tx}$——传输能量；

P_{active}——活跃期功率；

T'_{active}——活跃期节点运转时间，它随 T'_{tx}线性变化；

$E'_{active} = P_{active} \times T'_{active}$——活跃期能量；

P_{idle}——空闲功率；

T_{idle}——由 MAC 层协议决定的固定的空闲时间；

$E_{idle} = P_{idle} \times T_{idle}$——空闲能量。

还要注意的是

$$T'_{tx} = \frac{l}{R}, T_{idle} = T_d,$$

并且

$$T'_{tx} + T'_{active} + T_{idle} = T_{packet}$$

2. 空闲模式自适应调制的能耗

在 AM 中，节点在传输后工作在活跃模式，CPU 仍具有高的活跃性，这可能包括执

行后台程序和/或储存信息到存储器。然而，在 WSN 中，节点没有必要在每次传送后保持较高的活跃性。相反，它可以在传送后立即工作在空闲模式（见图 3.10）。这提供了额外的提高能量效率的方式。这个过程被称为空闲模式的自适应调制。其总的能耗取决于

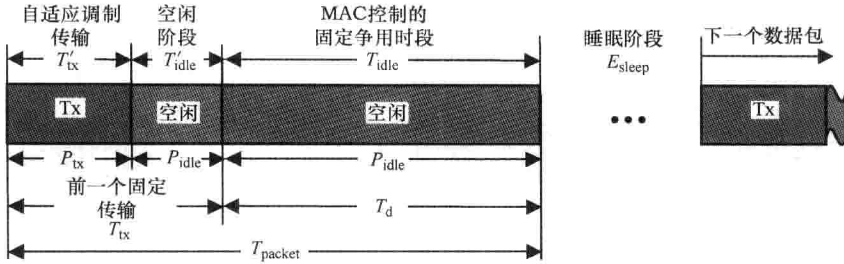


图 3.10 空闲模式自适应调制的能耗

$$
\begin{aligned}
E_c^{AMI} &= E'_{tx} + E'_{idle} \\
&= P_{tx} \times T'_{tx} + P_{idle} \times T'_{idle} + P_{idle} \times T_{idle} \\
&= P_{tx} \times \frac{l}{R} + P_{idle} \times (T_{packet} - T_d - \frac{l}{R}) + P_{idle} \times T_d \\
&= P_{tx} \times \frac{l}{R} + P_{idle} \times (T_{packet} - \frac{l}{R})
\end{aligned} \tag{3.32}
$$

式中 P_{tx}——传输功率；

$T'_{tx} = \frac{l}{R}$——自适应传输时间；

l——数据包长度；

R——AM 速率；

$E'_{tx} = P_{tx} \times T'_{tx}$——传输能量；

P_{idle}——空闲功率；

T'_{idle}——自适应空闲时间；

$T_{idle} = T_d$——固定的节点空闲时间；

$E_{idle} = P_{idle} \times T'_{idle} + P_{idle} \times T_{idle}$——空闲能量。

在这种情况下，有

$$T'_{tx} + T'_{idle} + T_{idle} = T_{packet}$$

3. 自适应调制模式自适应睡眠的能耗

为了进一步降低能耗，使用了基于 MAC 层协议、结合自适应睡眠和自适应调制的 ASAM 算法。如图 3.11 所示，MAC 仍然分配相同数量的空闲时段以确保先前的数据包被成功交付。然而，节点在预分配的争用时段 T_d之后立即转入睡眠阶段，而不是在活跃或空闲阶段停留一段时间。换句话说，对于此算法，额外的活跃或空闲阶段是不必要的。完成一个数据包的总时间自适应地减少了。因此，不仅传输时间由 AM 调整，睡眠时间也被 AS 改变了。能耗公式为

$$
\begin{aligned}
E_c^{\mathrm{ASAM}} &= E'_{\mathrm{tx}} + E_{\mathrm{idle}} + E'_{\mathrm{sleep}} \\
&= P_{\mathrm{tx}} \times T'_{\mathrm{tx}} + P_{\mathrm{idle}} \times T_{\mathrm{idle}} + P_{\mathrm{sleep}} \times T'_{\mathrm{sleep}} \\
&= P_{\mathrm{tx}} \times \frac{l}{R} + P_{\mathrm{idle}} \times T_{\mathrm{d}} + P_{\mathrm{sleep}} \times \left(T_{\mathrm{sleep}} - \frac{l}{R} - T_{\mathrm{d}}\right)
\end{aligned} \tag{3.33}
$$

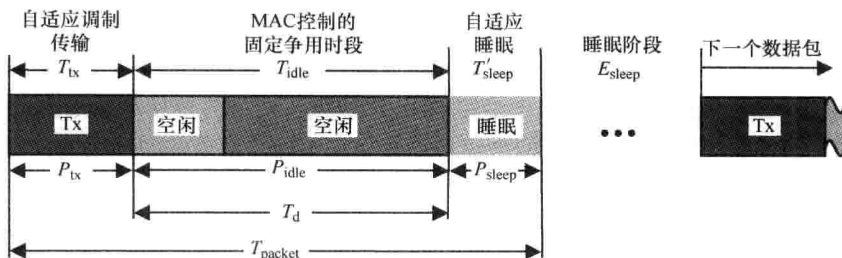


图3.11　自适应调制模式自适应睡眠的能耗

需要注意的是，在这种情况下，P_{sleep}是睡眠功率，T'_{sleep}为自适应睡眠时间，$E'_{\mathrm{sleep}} = P_{\mathrm{sleep}} \times T'_{\mathrm{sleep}}$是AS协议动态控制的睡眠能量。

3.5　仿真实例和图解

本节首先介绍仿真的步骤和方法，然后给出仿真结果，讨论实验参数和假设。在3.2节建立的框架的基础上，研究在不同程度的对数正态分布阴影和莱斯衰落信道条件下网络的能耗。研究不同链路的自适应策略，并用于评估网络生命周期。对AM、AMI和ASAM方案进行比较。分析不同的传输参数对节点生命周期的影响。此外，还计算了双链路中继网络的最佳功率分配向量，并研究其对网络生命周期的影响。

3.5.1　仿真目标

这项工作的目的是评估WSN能量约束条件下自适应调制策略的性能。通过考虑网络约束，在能量优化方法的基础上评估各种自适应链路协议，完成点至点通信的速率和功率联合优化。为降低多跳网络的能耗，进一步研究自适应功率分配算法，第二个目标是研究ASAM算法提高节能的能力。通过评估能量效率，比较使用不同算法时系统的工作生命周期。最后，研究了商用WSN收发机中AM、AMI 和ASAM的性能。

1. 仿真参数

选择仿真参数以满足最坏情况下的QoS要求[59,60]。有关的参数列于表3.1中。

2. 仿真假设

为确保仿真精度，减少复杂度，做出如下假设：

1）发射机和接收机都对CSI有正确的认识。

2）传输参数在一个帧周期内保持恒定。

3）传输过程中信道条件保持不变。

4）反馈信道没有引入误差，时延可以忽略不计。

5）传输过程是可靠的，所有数据包分开到达。

6）选择理想的路由节点，所有节点都知道自己相对于其他节点的位置。

3.5.2 能量优化

网络的能量效率高度依赖于传输参数和信道条件。仿真的焦点是通过调整网络参数评估不同的能量优化算法。对于一个给定的 BER 约束，网络的最佳能量通过共同考虑数据速率和发送功率获得。由于网络节点可以分布在不同信道条件的环境中，通过考虑每个链路不同的衰落效应来模拟信道条件。

共同优化数据速率和发送功率有助于降低衰落信道条件下的传输能耗。给定表 3.1 中列出的一组 MQAM 星座和 BER 约束，离散速率自适应的开关电平可以使用式（3.11）来计算。一旦平均信噪比超过阈值，发射机被设计成自动切换到下一级的调制方案。然而，在同一调制方案内，传输速率保持不变。使用式（3.22）和式（3.23）可获得最佳的传输速率。数据包因而以最佳的速率交付以减少传输时间。

表 3.1 仿真参数

参数	说明	值
K	莱斯 K 因子	{0, 5, 10, 15, 20} dB
σ	对数正态阴影方差	{0, 2, 4, 6, 8} dB
$\bar{\gamma}$	平均 SNR	10 ~ 36dB
P_b	QoS 要求的 BER	10^{-4}
M	MQAM 调制星座大小	{2, 4, 16, 64, 256}
B	信道带宽	200kHz
n	路径损耗指数	3
E_t	总的电池容量	1200mA · h
V	工作电压	3.6V
I_{tx}	发射电流	120mA
I_{active}	活跃电流	100mA
I_{idle}	空闲电流	1mA
I_{sleep}	休眠电流	0.1mA
T_d	争用时段的占空比	75%
T_{packet}	包持续时间	1 个单位时间

1. AM、AMI 和 ASAM 中的能耗

本节研究 AM、AMI 和 ASAM 中的能耗。回顾能耗公式，AM、AMI 和 ASAM 的节点生命周期基于每个算法所需要的不同的工作阶段来计算。我们使用自适应离散速率连续功率策略，分析成功交付了一定数量数据包的源节点的生命周期。

图 3.12 的对数正态阴影和图 3.13 的莱斯衰落分别显示了不同程度信道衰落条件下由三个算法实现的节点生命周期。从图中可以看出，ASAM 算法始终优于 AM 调幅方法。使用 ASAM 节点可以工作至 221 天，而使用 AM 最长的节点生命周期只有 42 天。这转化为约 80% 的改善。此外，AMI 相比 AM，节点生命周期也略有提高。在高 SNR 区域，AMI 延长了节点生命周期约 10 天。

在 AM 中，节点在传输阶段之后先是活跃的，然后切换到空闲阶段，最后进入睡眠阶段。在 AMI 中，活跃阶段被空闲阶段所取代，因为处理器只需要最小的功能性。因此，这部分从活跃期减少的能量留到空闲期。然而，由于睡眠阶段的功率电平是最少的，节点在最大的时间内停留在这个阶段是我们所希望的。ASAM 算法提供了根据 CSI 调整节点睡眠时间的最佳方法，并因此能进一步提高能量效率。ASAM 和 AM 之间的主要区别在于，前者在 MAC 层协议预分配的争用时段后立即进入睡眠阶段，而后者在进入争用时段之前的一段时间保持活跃。正如图中所验证的，睡眠阶段和活跃阶段功率的显著区别大大影响了节点生命周期。

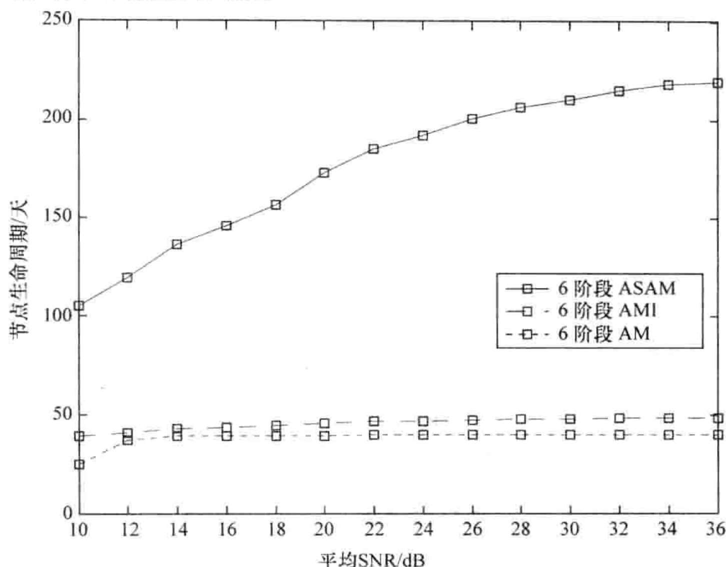


图 3.12　节点生命周期仿真：对数正态分布阴影信道六阶段 ASAM、AMI 和 AM 的比较（$\sigma = 2\text{dB}$）

此外，结果还表明有若干因素会影响节点生命周期。本节中研究的因素包括信道衰落、平均 SNR、话务强度和调制阶段。在下面的章节中会详细讨论。

2. 信道衰落和平均 SNR

正如本节所讨论的，不同的信道衰落条件对单节点的能耗施加不同的影响[56]。

传输协议允许发射机从六种调制阶段中选择：无传输、BPSK、4QAM、16QAM、64QAM 和 256QAM。这里考虑一个缓慢变化的平坦衰落信道。信道变化比符号数据的速率要慢得多，因此，它在每个传输周期近似保持恒定。分别用对数正态阴影和莱斯分布模拟信道衰落效应。对于对数正态分布，标准偏差 σ 从 {0，2，4，6，8} 中选择，对

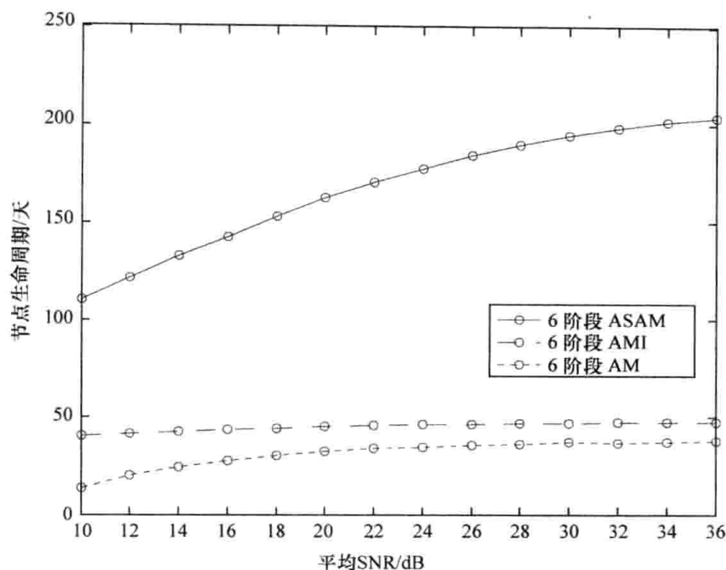


图 3.13 节点生命周期仿真：莱斯衰落信道六阶段 ASAM、AMI 和 AM 的比较（$K=5$dB）

于莱斯分布，K 因子从 {0，5，10，15，20} 选取。

图 3.14 和图 3.15 显示，对于对数正态阴影和莱斯衰落效应，节点生命周期分别是

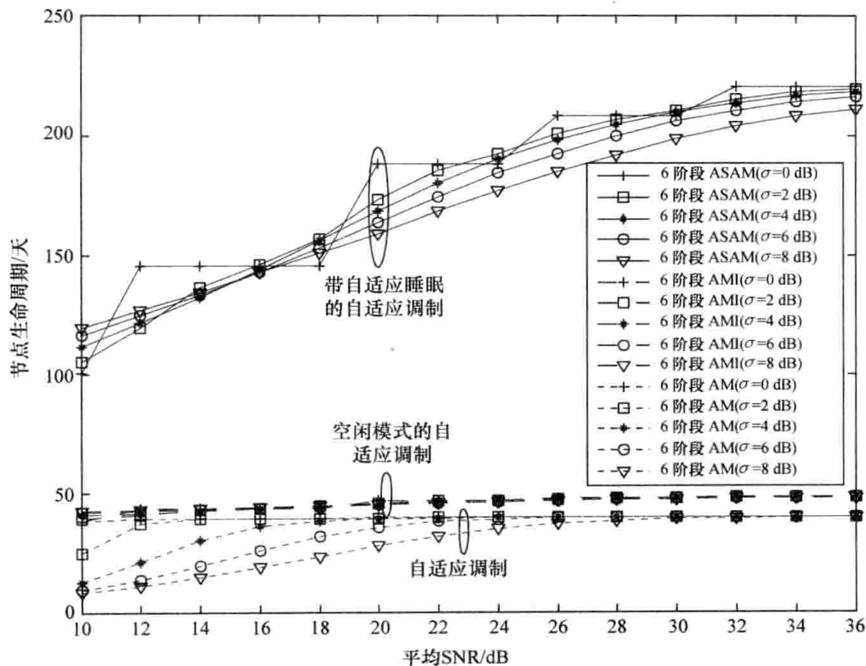


图 3.14 节点生命周期仿真：各种对数正态分布阴影信道六阶段 ASAM、AMI 和 AM 的比较

σ 和 K 的函数。图 3.14 清楚地表明，每种算法对于一个给定的平均 SNR，越强的对数正态遮蔽（即高的 σ 值），节点生命周期越短。换言之，网络工作在良好的信道条件下能耗降低。莱斯衰落的情形与之相似（见图 3.15）。当无线信道中的衰落较小时（即 K 值较高），节点可以工作更长的时间。莱斯 K 因子的强度决定了点对点通信的视距（LOS）。因此，更小的 K 因子引起信道更深的衰落，结果是生命周期更短。此外，图像还表明，节点生命周期在很大程度上依赖于网络的平均 SNR。对于相同的信道衰落条件，增加平均 SNR，节点生命周期会延长。这一趋势对对数正态阴影和莱斯衰落信道条件都适用。对于强衰落的情形，一个差的 SNR 能大大降低节点生命周期的性能。

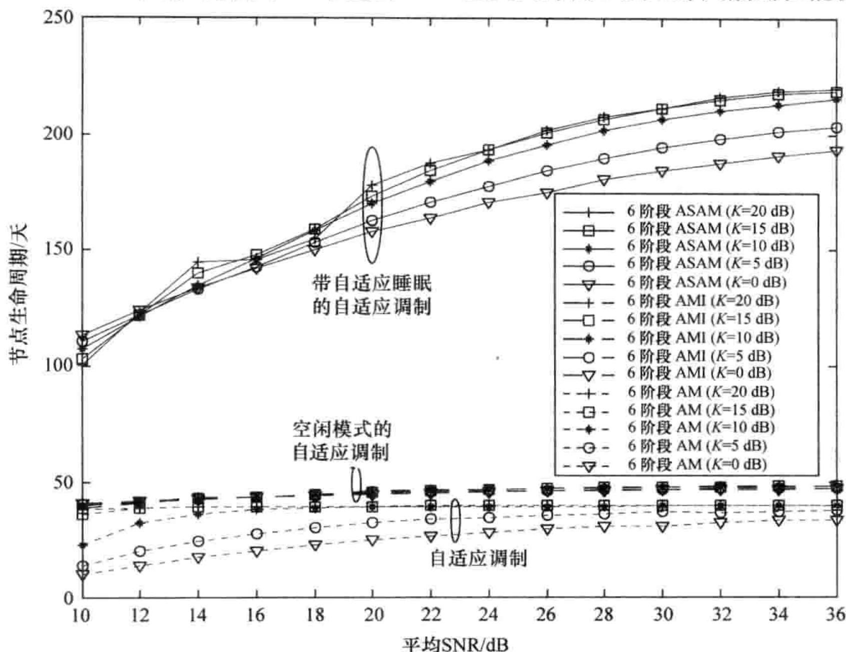


图 3.15　节点生命周期仿真：各种莱斯衰落信道六阶段 ASAM、AMI 和 AM 的比较

虽然这些图表明，所有算法在信道衰落更小、SNR 更大时，传感器节点运行时间更长，不同算法的信道衰落条件和平均 SNR 对能耗有明显的影响。对于 AM，低 SNR 比高 SNR 的信道条件对节点生命周期的影响更高。随着平均 SNR 的增加，不同衰落条件之间的生命周期差距变小。例如，在图 3.14 中，平均 SNR 大于 30dB 时，节点的生命周期曲线大致彼此重叠。这里也可以得出结论：当节点工作在深信道衰落下时，平均 SNR 值成为能耗的主导因素。然而，不同于 AM 中良好的信道条件会大大改善节点生命周期，AMI 的信道衰落条件和平均 SNR 值仅仅稍微影响了能耗。

这是由于在 AM 中，数据包成功发送后的一段时间信道仍保持活跃。对于工作在信道条件较差的节点，有更高的几率重新发送数据包。重新发送会产生更多的节点活跃期功耗。另外，AMI 在传输后立即把节点置于空闲阶段。即使在恶劣的信道条件下重传了很多次，节点重发后也只消耗了通常远远小于活跃期功率的空闲功率。AMI 各种信道衰

落等级之间的能耗差异因此并不明显。

ASAM 中信道衰落条件和平均 SNR 也对节点生命周期有显著影响。与 AM 相比，ASAM 算法的性能受平均 SNR 的影响更明显。ASAM 中最低和最高 SNR 的节点生命周期之间的差异是约 120 天，而对于 AM，差异只有不到 30 天。此外，对于 AM 和 ASAM，节点生命周期分别在低 SNR 和高 SNR 区域更容易受信道条件变化的影响。

有趣的是，还可以从图 3.14 和图 3.15 中看到，对于 AMI 和 ASAM，在较低的平均 SNR 区域，σ 值较大与较小的情况相比，节点生命周期更长。回想一下，σ 表示瞬时 SNR 的标准偏差。在低平均 SNR 的情形下，较大的 σ 显示更高的重发概率和更高的具有较大数据速率的传输概率。重发导致额外的能耗，而更高的数据速率则通过使用更少的传输时间降低能量成本。对于 AMI 和 ASAM，重发成本本质上是很小的，因此从高速传输获得的能量节约大于重发的消耗。也就是说，σ 越大，节点生命周期越长，如图中所示。另外，对于 AM 的情况，相对于较长的生命周期，较小的 σ 始终产生更好的性能。这种现象的发生是因为：由于重发时使用的是活跃期功率电平，AM 的重发成本明显高于 AMI/ASAM。这种情况下具有较大 σ 的劣势超过了其优势。

此外，在平均 SNR 较高的情形下，节点已经以较高的速率发送数据。因此，增大 σ 可能在很小的程度上有助于获得更好的传输速度，但却增加了拥有低的瞬时 SNR 的可能性，也就是一个低的数据传输速率和更多的能耗。正如图中所反映的，在高的平均 SNR 区域，较小的 σ 总会导致较长的节点生命周期。

3. 话务强度

话务强度是衡量一段时间内无线资源的平均占用度。网络的能耗根据话务强度差异很大。本节进一步研究具有不同网络话务强度的 AM、AMI 和 ASAM 的能耗，即 1%、10% 和 100%。网络流量使用泊松随机分布建模。强度越大，表示在同一通信时间段需要传输的数据包更多。

图 3.16 和图 3.17 描绘 AM 在不同话务强度分别对应于对数正态阴影和莱斯衰落的节点生命周期。图中显而易见的是，对于低的和中等的平均 SNR，低流量的通信产生更高的节点生命周期。对于一个给定的话务强度，不同衰落水平的节点生命周期曲线在平均 SNR 增加时趋于收敛。根据衰落类型，1% 话务强度时收敛的节点生命周期大概是 100% 强度情况下的 3~5 倍。而且，收敛速度也依赖于话务强度。通信量越大，生命周期曲线达到收敛所需要的平均 SNR 越大。

同样的，也研究了 AMI 中话务强度对能耗的影响。图 3.18 和图 3.19 说明了 AMI 算法对于不同通信量负载的反应。正如图中所示，与 AM 的情况类似，信道中较大的通信量负载使传感器节点的生命周期减少。节点在 1% 话务强度下可以工作高达约 49 天，而在 10% 和 100% 的话务强度下，时间分别缩短为 46 天和 38 天。

图 3.20 和图 3.21 给出了 ASAM 算法的结果。在低的通信量情形下，节点生命周期可高达 439 天，这几乎是 AM 和 AMI 节点生命周期的 10 倍以上。当网络通信量负载变大到 10% 的强度，节点生命周期减少近一半到 220 天。即使在满负荷时（即 100% 的话务强度），节点仍然可以工作超过 50 天，高于 AM 和 AMI。

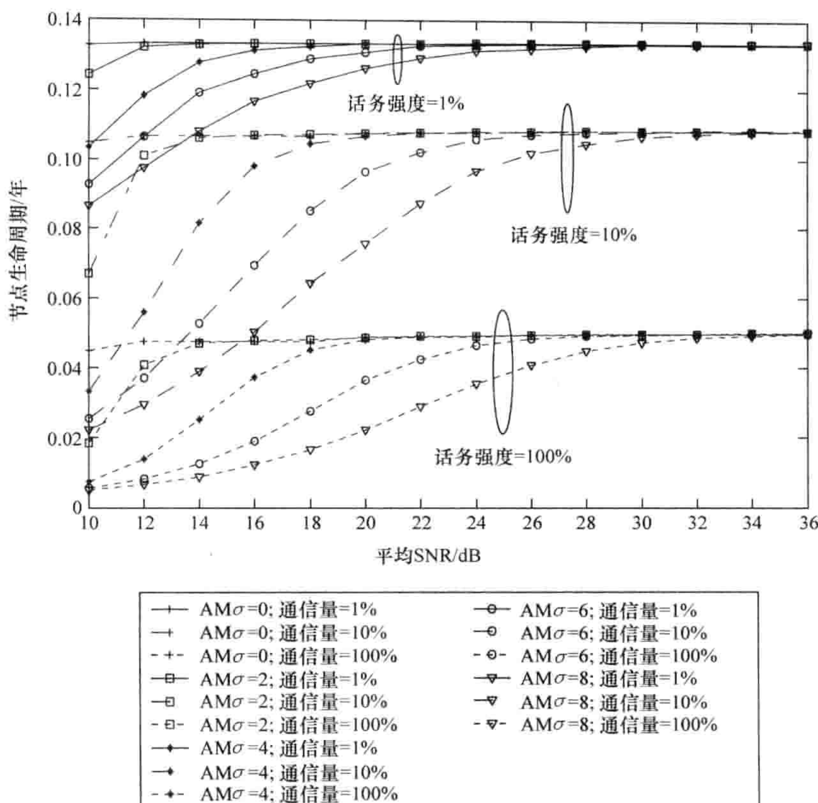


图 3.16　对数正态分布阴影信道使用 AM 算法话务强度对节点生命周期的影响
（信道通信量是负载量的 1%、10% 和 100%）

对于所有的算法，可以得出结论：节点的生命周期性能高度依赖于网络中传输的数量。这个结果是预料之中的，因为当网络具有较大的通信量负载时，意味着更多的数据包在队列中等待交付。为了完成所有数据包的传输，节点必须从电池消耗更多的能量，导致较短的生命周期。在本章的其余部分，话务强度被假定为等于 100%。

4. 调制阶段

AM 使用的调制阶段的数量随不同的应用而变化，也受到实际执行复杂性的制约。在这个实验中，比较了使用不同调制阶数的 AM、AMI 和 ASAM 的能量效率。比较了四种情况：①三个阶段（无传输、BPSK、QPSK）；②四个阶段（无传输、BPSK、QPSK、16QAM）；③五个阶段（无传输、BPSK、QPSK、16QAM、64QAM）；④六个阶段（无传输、BPSK、QPSK、16QAM、64QAM、256QAM）。

四种情况的节点生命周期如图 3.22 和图 3.23 所示。可以看出，发射机建立的调制阶段越多，传感器节点可以工作的时间越长。这是由于调制电平限制了传输速率。只能选择低级别调制方案的发射机即使在非常良好的信道条件下也必须使用较小的数据传输速率，从而增加了传输时间。另外，当发射机可以从更高级别的调制方案中选择时，传

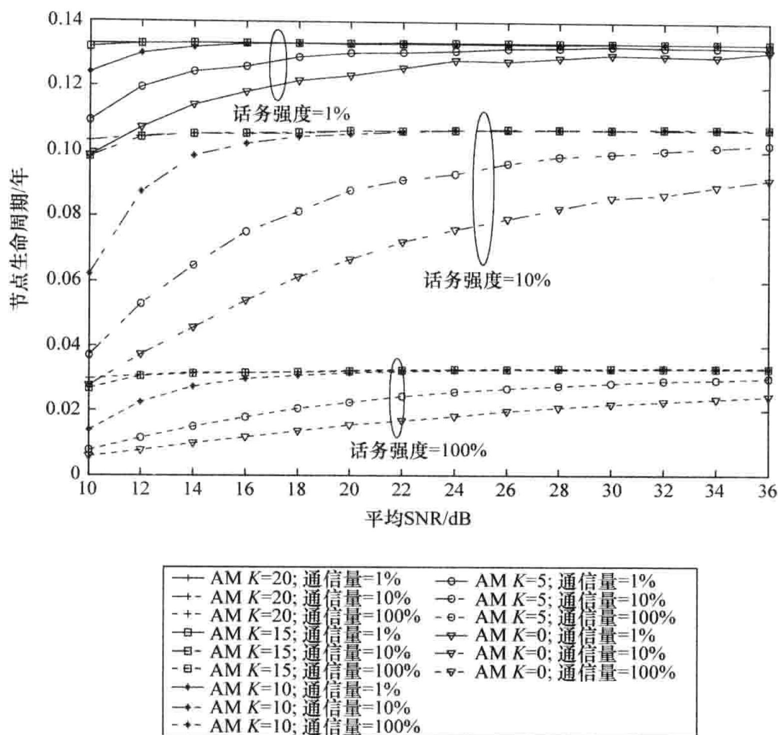


图 3.17 莱斯衰落信道使用 AM 算法话务强度对节点生命周期的影响
（信道通信量为负载量的 1%、10% 和 100%）

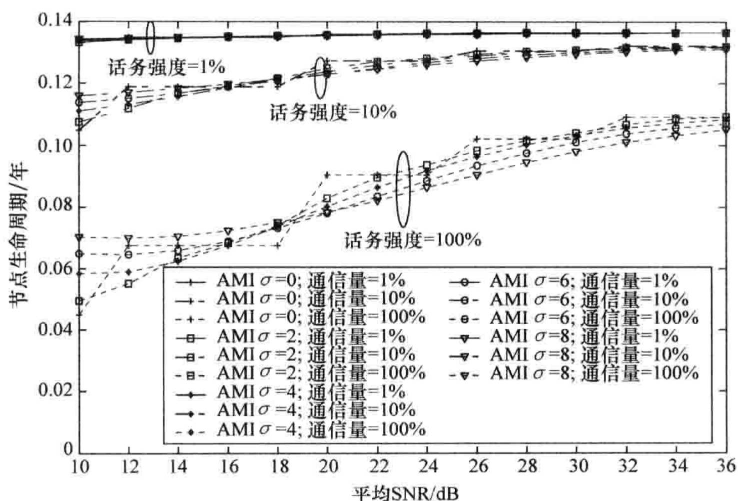


图 3.18 对数正态分布阴影信道使用 AMI 算法话务强度对节点生命周期的影响
（信道通信量为负载量的 1%、10% 和 100%）

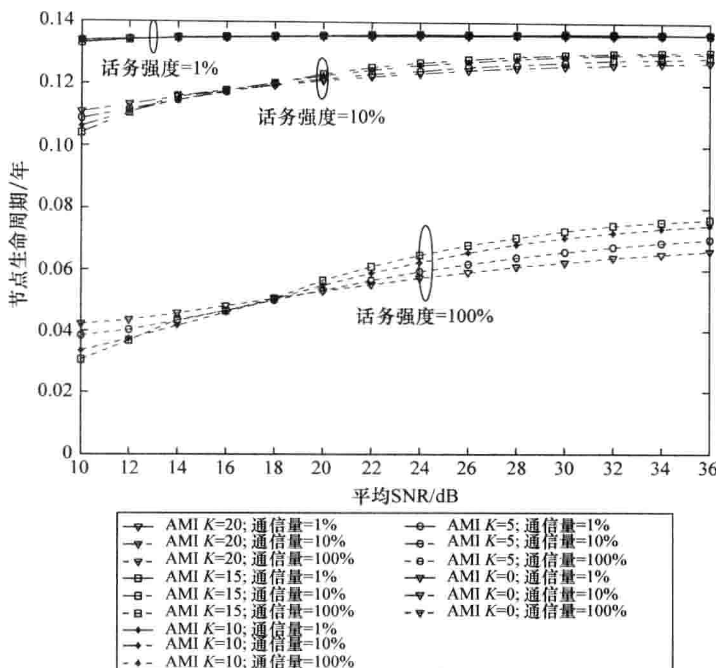


图3.19 莱斯衰落信道使用AMI算法话务强度对节点生命周期的影响
（信道通信量为负载量的1%、10%和100%）

输从良好的信道条件下实现的更高的数据速率中获益，从而减少了能耗。此外，也可以看到，有多个调制阶段的发射机在某些SNR阈值之后表现出优势。这些阈值取决于离散速率连续功率的链路自适应策略。

比较AM、AMI和ASAM，图中清晰地显示：ASAM的调制阶数对节点生命周期的显著影响最大，其次是AMI，AM的影响最小。一般情况下，有更多调制阶段的发射机具有更长的工作生命周期。ASAM实现了最重要的改进，当阶数从三个阶段增加到六个阶段时，节点生命周期增加了70多天。在AMI中使用更多的调制阶段时节点生命周期也略有好转，在良好的信道条件下，更多的阶段可以增加节点生命周期长达7天。然而，使用AM算法时调制阶段的数量几乎没有影响节点生命周期，在相同条件下获得的改善不超过一天。

这种行为可以解释如下。使用更多调制阶段的主要好处在于增加了利用良好信道条件的能力以减少传输时间。在节省的时间段内，节点可以从最耗电的传输阶段切换到其他一些阶段，取决于具体的算法。在ASAM和AMI之间，前者在期间转为睡眠阶段，而后者的节点仍然需要工作在空闲阶段，同时消耗额外的空闲期能量。然而，对于AM而言，节点在传输后处于活跃期，此时的功率电平尽管比传输功率低，仍然远高于睡眠和空闲期的功率电平。其结果是，尽管在AM中发射机能够选择具有更高数据速率的调制级别，节约的能量与ASAM或AMI相比是可忽略的。

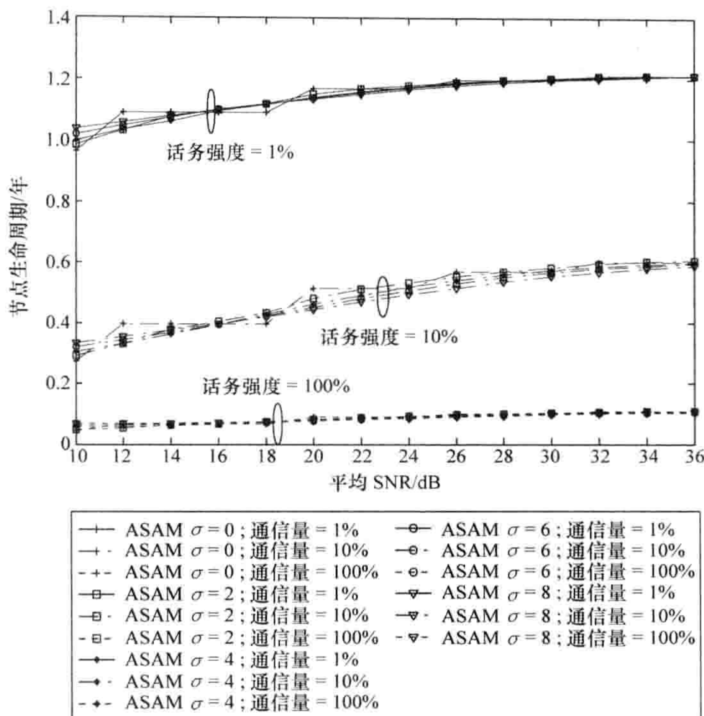


图 3.20 对数正态分布阴影信道使用 ASAM 算法话务强度对节点生命周期的影响（信道通信量为负载量的 1%、10% 和 100%）

5. 能耗探讨

仿真结果表明，在降低能耗上，ASAM 优于 AM 和 AMI。一般情况下，AM、AMI 和 ASAM 中传输参数对节点生命周期的影响是相似的。对于所有的算法，对数正态分布阴影和莱斯衰落条件对节点生命周期显示出类似的影响。当无线链路位于有轻微衰落和高平均 SNR 的良好的信道条件下，节点可以工作更长的时间。发射机有较低的通信量负载和更多的调制阶段，也有助于改善生命周期。

然而，正如仿真结果所示的，还是存在一些不同。比较不同程度的衰落效应下的能耗，可以发现，AM 和 ASAM 的节点生命周期从良好的信道条件中充分受益。AM 中较小的信道衰落可以延长节点生命周期约 30 天，而 ASAM 相比深衰落的情况，节点生命周期的最大增量可达 20 天。另外，信道条件对 AMI 节点生命周期的影响是微不足道的。此外，低 SNR 时信道衰落条件的变化对 AM 节点生命周期的影响相当大。然而，对于 ASAM，改变平均 SNR 与信道衰落的影响基本是一致的，因此信道衰落和平均 SNR 都对网络的能耗起着重要作用。

此外，ASAM 调制阶段的数量对节点生命周期有相当大的影响。当从三阶段调制切换到六阶段调制时，节点生命周期可以提高至 70 天。对于 AMI，发射机使用更多的调制阶段有助于提高节点生命周期 7 天。然而，AM 从中获得的改善程度是轻微的，在良

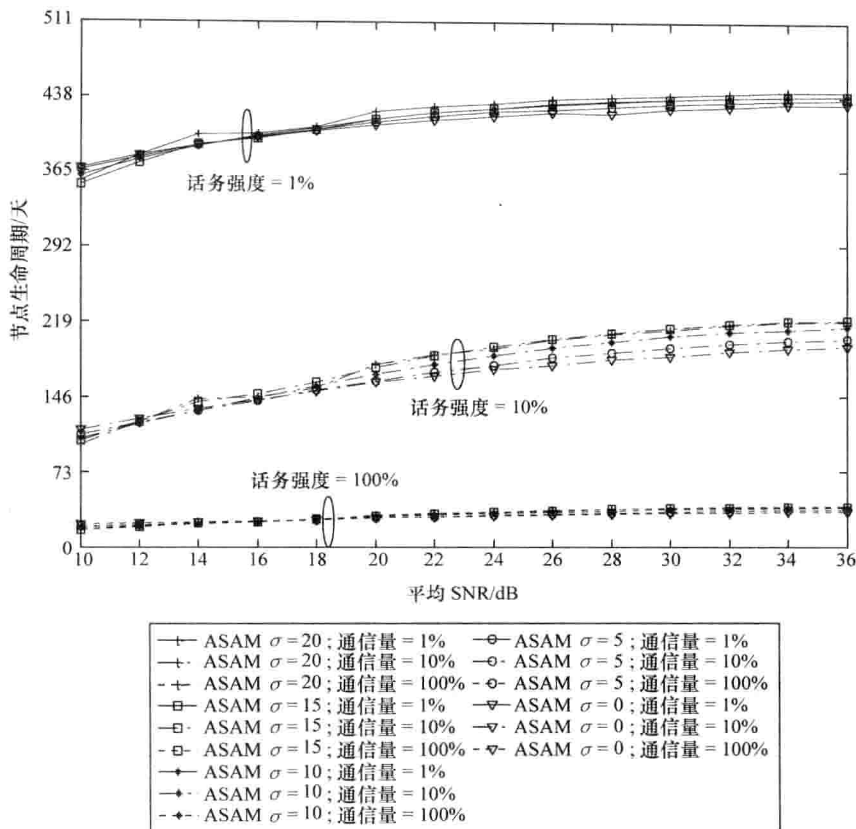


图 3.21　莱斯衰落信道使用 ASAM 算法话务强度对节点生命周期的影响
（信道通信量为负载量的 1%、10% 和 100%）

好的信道条件下使用更多的调制阶段略微增加了一天的工作时间，在信道条件较差时改善甚至更小。此外，在发射机上建立大量的调制方案增加了硬件实现的复杂性。设计 AM 协议时，必须考虑通过使用多调制阶段获得的能耗降低与实际实施复杂性和成本之间的权衡。

3.5.3　功率控制自适应策略

本节深入研究单跳网络的自适应功率控制策略。链路自适应有六个调制阶段，目标 BER 被设定为 10^{-4}，平均 SNR 为 10～36dB。

由于只有当发射机被切换到下一个调制级时功率电平才迅速增加（第 3.3.5 节第 3 部分），通信过程中使用的发射功率并不必要保持在最高水平为一个常数。引入功率控制因子以调整相同调制等级中发射功率的值。基于式（3.6），得到功率自适应控制因子的最佳值如图 3.4 所示。

分析中，功率和速率共同地适应信道条件。考虑具有最佳离散速率和最佳功率控制

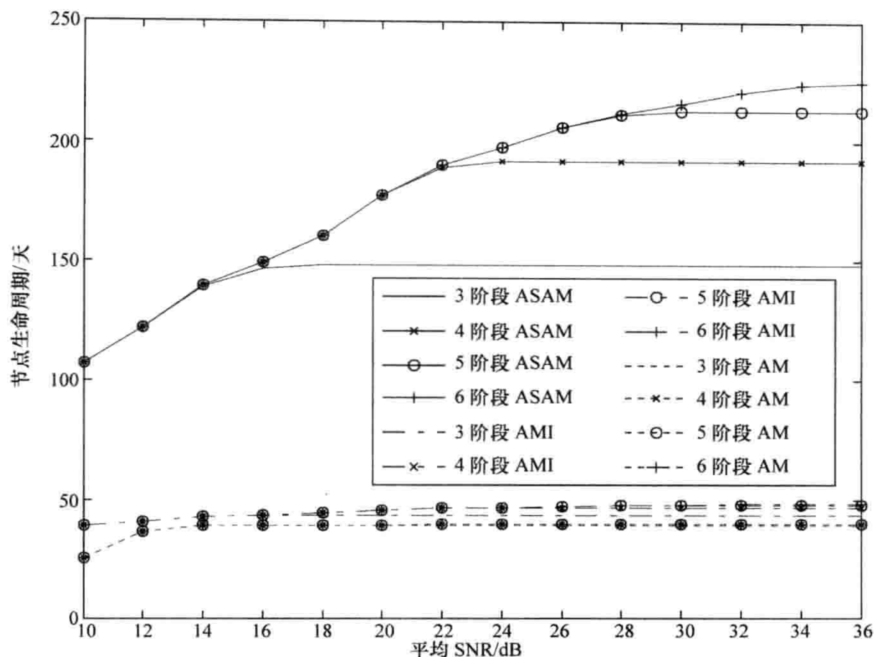


图 3.22 对数正态分布阴影信道使用 ASAM、AMI 和 AM 调制阶段对节点生命周期的影响 ($\sigma = 2\text{dB}$)

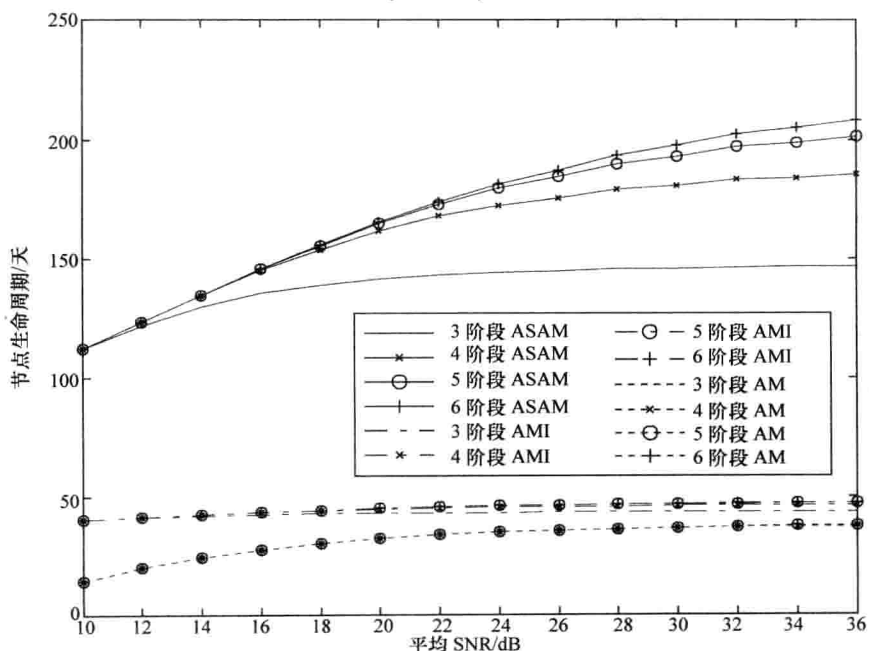


图 3.23 莱斯衰落信道使用 ASAM、AMI 和 AM 调制阶段对节点生命周期的影响 ($K = 5\text{dB}$)

的链路自适应，以便在给定的平均 BER 约束下实现最大的频谱效率。比较了以下六种情况之间的节点生命周期：①ASAM - PC（Adaptive Sleep combined with Adaptive Modulation under Power Control，功率控制下结合自适应调制的自适应睡眠）；②结合自适应调制的自适应睡眠，没有功率控制（ASAM）；③AMI - PC（Adaptive Modulation with Idle mode under Power Control，功率控制下空闲模式的自适应调制）；④空闲模式的自适应调制，没有功率控制（AMI）；⑤AM - PC（Adaptive Modulation under Power Control，功率控制下的自适应调制）；⑥自适应调制，没有功率控制（AM）。仍然考虑了不同的衰落等级。

图 3.24 和图 3.25 显示了 ASAM 优越的性能，这是由于它具有很好的适应能力，使得该算法能动态地调整传输阶段和睡眠阶段的操作持续时间。然而，AMI 和 AM 中功率控制的结果是得到微不足道的改进，因为节点只适应传输阶段的持续时间，而不考虑活跃和空闲阶段。即使功率控制算法能够降低传输阶段的功率电平，活跃能量和空闲能量部分仍然主导着网络中的总能耗。因此，在大多数情况下，ASAM 功率控制的效果会比 AM 和 AMI 更明显。

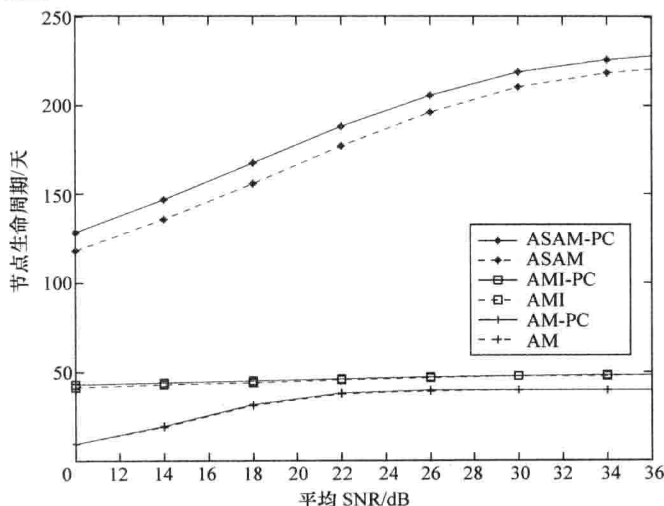


图 3.24　对数正态分布阴影信道使用六阶段 ASAM 和 AM 时功率控制对节点生命周期的影响（$\sigma=6\text{dB}$）

3.5.4　双链路中继网络自适应

当网络中有多个节点时，节点之间的通信可以分为两种类型：①通过中继节点传输源数据到目标节点的多中继网络；②存在多个信源和目标节点的多链路网络，并且每个信源独立地传输数据到它的目标节点。这里深入研究双链路中继网络使用链路自适应的能耗。

回顾 3.4.3 节第 1 部分中继网络链路自适应控制的解释。这里采用了那里提出的自适应功率分配策略。网络生命周期取决于沿着通信路径的所有无线链路的能耗。虽然网

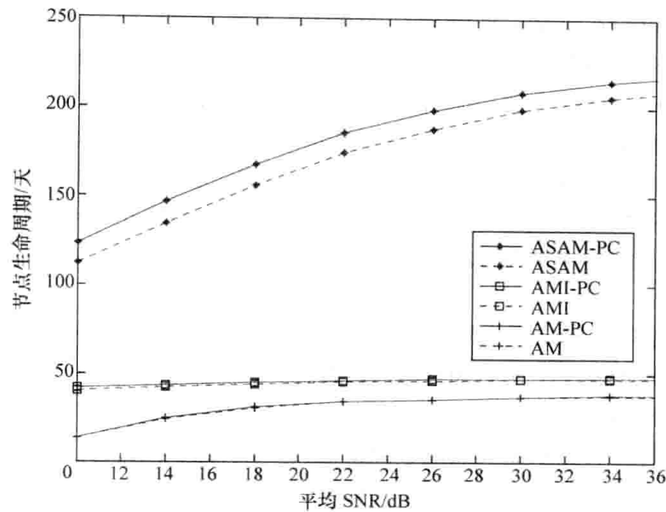


图 3.25 莱斯衰落信道使用六阶段 ASAM 和 AM 时功率控制对节点生命周期的影响（$K=5\text{dB}$）

络中总的可用的能量是有限的，为每个节点分配的功率却可以调整，以达到具有最小能耗的最佳的传输质量。

该仿真考虑最简单的带一个中继节点的中继网络，这样信息将始终通过中继节点路由到目标节点。因此网络中创建了两个链路：信源到中继和中继到目标节点。由于无线多径和散射，两个无线链路可以具有不同的衰落效应。因此，功率分配策略负责根据链路瞬时的衰落信息分配最佳功率。比较了最优的功率分配算法与链路之间平分总能量的情况。

这两个链路的最优功率分配因子计算见表 3.2 和表 3.3，分别对应于对数正态分布阴影和莱斯衰落的情况。这些值也证实了先前的观察，即 ASAM 从功率分配中获益比 AM 更多。一般情况下，功率分配偏向具有较差信道条件的链路。这是由于能量资源必须以网络中所有链路在最大的时间段内保持同时工作的方式进行分配。通常情况下，最差信道条件下的节点具有低的能量效率并首先衰退。回顾式（3.29），由于只有当两个链路都活跃时网络才被认为是有用的，两个链路最小的生命周期需要最大化。这样的现象自然会对在较差信道条件下具有较高能耗的链路给予更多的能量；通过延长该链路的生命周期，整个网络的生命周期得以延长。

表 3.2 两个链路的最优功率分配因子：$\sigma_1=2\text{dB}$，$\sigma_2=\{0, 4, 6, 8\}\text{dB}$

最优分配因子	方法	SNR							
		10dB	14dB	18dB	22dB	26dB	30dB	34dB	38dB
		两个链路的信道条件：$\sigma_1=2\text{dB}$，$\sigma_2=0\text{dB}$							
α1	ASAM	0.56	0.56	0.55	0.54	0.53	0.51	0.51	0.5
α2		0.44	0.44	0.45	0.46	0.47	0.49	0.49	0.5

（续）

最优分配因子	方法	SNR							
		10dB	14dB	18dB	22dB	26dB	30dB	34dB	38dB
α1	AMI	0.51	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.49	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α1	AM	0.56	0.55	0.54	0.53	0.53	0.51	0.5	0.5
α2		0.44	0.45	0.46	0.47	0.47	0.49	0.5	0.5
		两个链路的信道条件：$\sigma_1=2$dB，$\sigma_2=4$dB							
α1	ASAM	0.44	0.44	0.45	0.46	0.47	0.49	0.49	0.51
α2		0.56	0.56	0.55	0.54	0.53	0.51	0.51	0.49
α1	AMI	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α1	AM	0.33	0.43	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.57	0.55	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5
		两个链路的信道条件：$\sigma_1=2$dB，$\sigma_2=6$dB							
α1	ASAM	0.45	0.41	0.39	0.38	0.35	0.32	0.3	0.29
α2		0.55	0.59	0.61	0.62	0.65	0.68	0.7	0.71
α1	AMI	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.51	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α1	AM	0.32	0.33	0.44	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.68	0.67	0.56	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5
		两个链路的信道条件：$\sigma_1=2$dB，$\sigma_2=8$dB							
α1	ASAM	0.43	0.4	0.36	0.31	0.27	0.23	0.21	0.19
α2		0.57	0.6	0.64	0.69	0.73	0.77	0.79	0.81
α1	AMI	0.48	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5
α2		0.52	0.51	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5
α1	AM	0.27	0.28	0.38	0.45	0.48	0.5	0.5	0.5
α2		0.73	0.72	0.62	0.55	0.52	0.5	0.5	0.5

表 3.3　两个链路的最优功率分配因子：$K_1=10$dB，$K_2=\{0, 5, 15, 20\}$dB

最优分配因子	方法	SNR							
		10dB	14dB	18dB	22dB	26dB	30dB	34dB	38dB
		两个链路的信道条件：$K_1=10$dB，$K_2=0$dB							
α1	ASAM	0.43	0.4	0.36	0.31	0.27	0.23	0.21	0.19
α2		0.57	0.6	0.64	0.69	0.73	0.77	0.79	0.81
α1	AMI	0.47	0.48	0.48	0.48	0.49	0.49	0.5	0.5
α2		0.53	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.5	0.5
α1	AM	0.31	0.32	0.37	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46
α2		0.69	0.68	0.63	0.59	0.58	0.56	0.55	0.54

（续）

最优分配因子	方法	SNR							
		10dB	14dB	18dB	22dB	26dB	30dB	34dB	38dB
		两个链路的信道条件：$K_1=10\text{dB}$，$K_2=5\text{dB}$							
α1	ASAM	0.47	0.46	0.44	0.42	0.39	0.37	0.36	0.35
α2		0.53	0.54	0.56	0.58	0.61	0.63	0.64	0.65
α1	AMI	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5
α2		0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5
α1	AM	0.37	0.4	0.44	0.47	0.47	0.48	0.49	0.49
α2		0.63	0.6	0.56	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51
		两个链路的信道条件：$K_1=10\text{dB}$，$K_2=15\text{dB}$							
α1	ASAM	0.52	0.55	0.56	0.58	0.59	0.6	0.62	0.64
α2		0.48	0.45	0.44	0.42	0.41	0.4	0.38	0.36
α1	AMI	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.5	0.5
α2		0.48	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5
α1	AM	0.61	0.54	0.53	0.51	0.51	0.51	0.5	0.5
α2		0.39	0.46	0.47	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5
		两个链路的信道条件：$K_1=10\text{dB}$，$K_2=20\text{dB}$							
α1	ASAM	0.53	0.56	0.57	0.59	0.61	0.64	0.65	0.68
α2		0.47	0.44	0.43	0.41	0.39	0.36	0.35	0.32
α1	AMI	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.51	0.5	0.5
α2		0.47	0.47	0.48	0.48	0.48	0.49	0.5	0.5
α1	AM	0.67	0.63	0.59	0.54	0.52	0.51	0.51	0.51
α2		0.33	0.37	0.41	0.46	0.48	0.49	0.49	0.49

可以从图3.26和图3.27看出，对于双链路中继网络，节点生命周期的提高可以从具有最优功率分配的所有算法中获得。对功率分配算法和ASAM的组合，改善更为显著。由于使用ASAM的节点生命周期比使用AM更受信道条件的支配，ASAM明智地根据其信道衰落分配能量给每个链路，这对提高整个网络的能量效率是非常重要的。

此外，结果还表明，在两个链路之间更明显的衰落条件下可以达到一个较为可观的增量。而且，AM方案的功率分配在低SNR区域比在高SNR区域表现更好；而ASAM的功率分配算法在高SNR区域改善网络生命周期更多。正如在第3.5.2节第2部分中提到的，在高SNR区域，AM方案的节点生命周期在不同程度的衰落条件下趋于收敛，因此信道衰落条件的变化只对能耗施加较小的影响。然而，在低SNR的情况下，节点生命周期对衰落条件更加敏感，结果是，能量资源需要更仔细地分配以提高能量效率。相反，对于ASAM，在高平均SNR的情况下，信道衰落对节点生命周期具有更重要的影响。因此，在这种情况下，当SNR增大时自适应功率分配要求更高。

3.5.5 商用WSN节点的性能

一些出版的著作研究了IEEE 802.15.4标准下收发机的性能，测量不同工作模式下

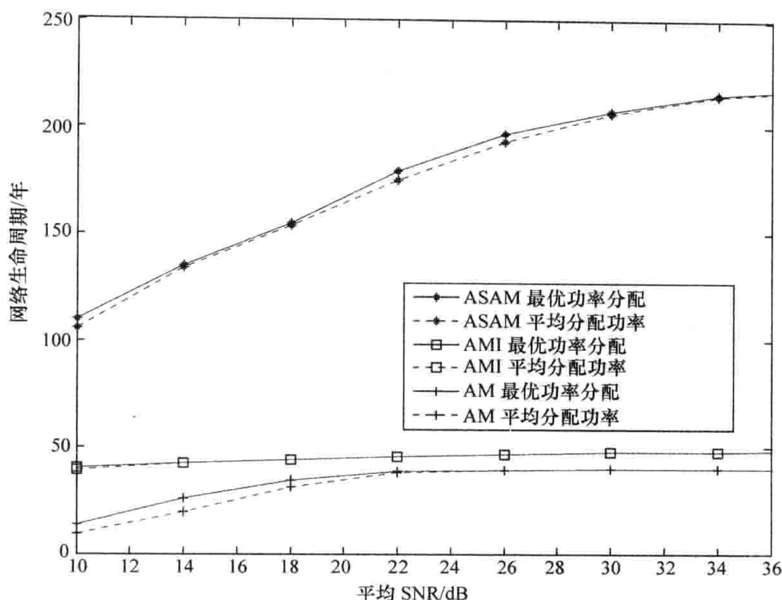


图 3.26 对数正态分布阴影信道的功率分配（双链路信道条件：$\sigma_1 = 2\text{dB}$，$\sigma_2 = 6\text{dB}$）

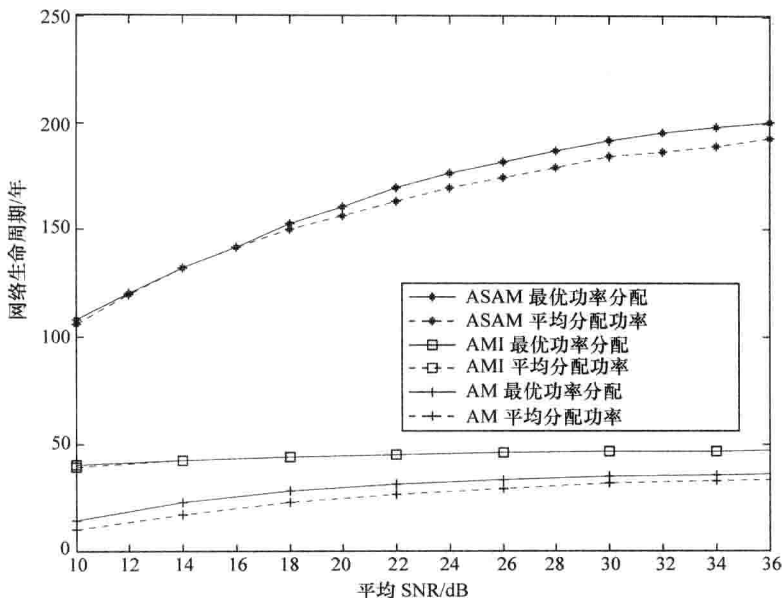


图 3.27 莱斯衰落信道的功率分配（双链路的信道条件：$K_1 = 10\text{dB}$，$K_2 = 0\text{dB}$）

从电源获取的电流值[61-63]。基于这些实验所得的电池消耗数据，节点生命周期被计算为传感器节点工作电流的一个函数。这里评估了三种商用无线收发机，即 CC2430、CC2520、MC1322。为了节约能量，商用 IEEE 802.15.4 标准的收发机可以在具有不同电流消耗的工作模式之间进行切换。这里重点关注传输、活跃和睡眠模式下的电流消

耗。这些工作模式的功能解释见 3.4.1 节。

表 3.4 显示了收发机三种工作模式中的电流消耗，所提供的数据表是基于实验的结果。每个节点总的可用电池容量被假定为 1200mA · h，数据包每 10 秒发送一次。

表 3.4 CC2430、CC2520 和 MC1322 收发机的电流消耗

收发机	工作电压/V	传输阶段/mA	活跃阶段/mA	空闲阶段/mA	休眠阶段/μA
CC2430	2.0~3.6	27	12.3	0.19	0.3
CC2520	1.8~3.6	25.8	10	0.175	0.03
MC1322	2.0~3.6	32	15	0.9	0.3

图 3.28 和图 3.29 所示为 ASAM 在三种链路自适应技术中始终产生最长的工作时间。比较 AMI 和 AM，虽然前者稍微提高了节点的生命周期，二者的性能一般都非常接近。商用收发机的节点生命周期性能趋势非常类似于以前的模拟发射机模型。这表明所提出的 ASAM 算法对提高商用的兼容 IEEE 802.15.4 标准的收发机的节点生命周期是一种很有前途的技术。此外，由于较小的衰落效率很少导致重传，良好的信道条件也能提高节点生命周期。

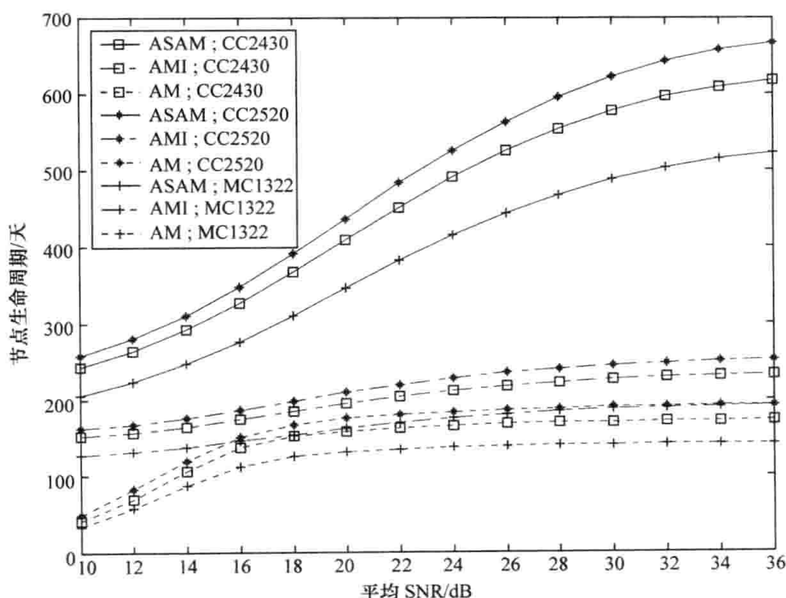


图 3.28 对数正态分布阴影信道条件下商用兼容 IEEE 802.15.4 标准的收发机使用六阶段 ASAM、AMI 和 AM 时节点生命周期的比较（$\sigma=4$dB）

此外，由于发射机的传输、活跃、空闲和睡眠阶段具有不同的电流消耗，这些值影响了功率电平，并因此影响了节点总的能耗。因此，分析由不同的电流消耗所引起的节点生命周期的变化是有价值的。观察到所有的商用发射机比模拟发射机模型具有低得多的电流消耗值（见表 3.1 的参数值）。如表 3.4 中所列出的，CC2520 对所有的工作模式具有最低的总体电流消耗，而 MC1322 具有最高的消耗。

考虑到这些商业产品具有较小的电流消耗，所有商用收发机的节点生命周期整体长

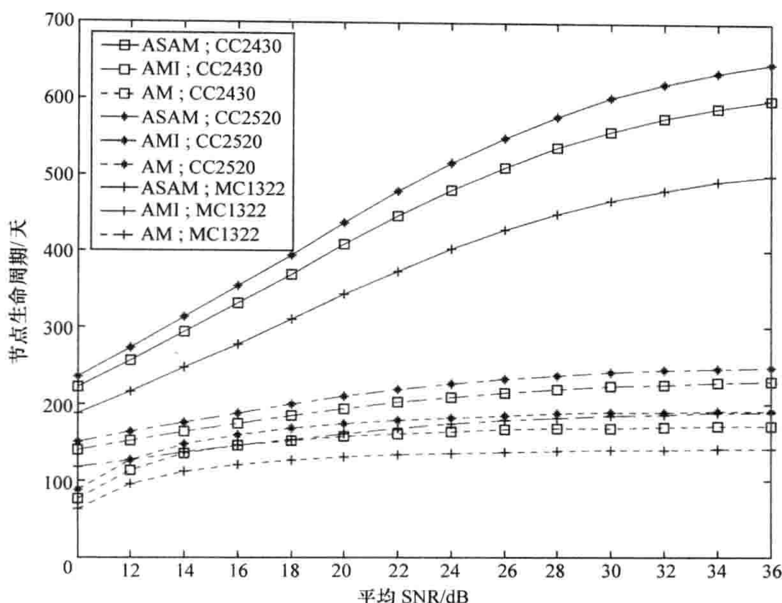


图 3.29　莱斯衰落信道条件下商用兼容 IEEE 802.15.4 标准的收发机使用六阶段 ASAM、AMI 和 AM 时节点生命周期的比较（$K=10\text{dB}$）

于模拟发射机模型。CC2520 收发机具有最长的节点生命周期，因为它工作时整体电流消耗最低。良好的信道条件下，使用 ASAM 算法时，它可以工作超过 625 天，而使用 AM 和 AMI 时，它仍然可以分别持续工作近 200 天和 250 天。CC2430 具有适中的节点生命周期，比较接近 CC2520。对于相同的信道条件，CC2430 使用 ASAM 算法的工作生命周期高达 615 天，使用 AMI 和 AM 技术分别是 245 天和 181 天。MC1322 收发机的节点生命周期最短：使用 ASAM、AMI 和 AM 分别为 510 天、198 天和 146 天。这是意料之中的，因为 CC2520 和 CC2430 收发机在空闲阶段消耗电流低。相比 MC1322，CC2520 和 CC2430 空闲模式的电流消耗可减少到接近 1/5。尽管 CC2520 和 CC2430 具有非常相近的空闲模式电流，其电流消耗在传输模式和主动模式仍然是不同的。CC2430 相对 CC2520 较高的电流消耗导致了它具有较短的节点生命周期。

在所有工作模式的电流值中，空闲模式的电流消耗是决定节点生命周期最重要的因素。然而，传输和活跃模式的耗用电流也表现出小的影响。此外，睡眠阶段的电流消耗对节点生命周期也有相当大的影响，特别是对于 ASAM 算法。由于 ASAM 自适应地调整睡眠阶段的持续时间，睡眠电流消耗的减少可以进一步提高节点的生命周期。

3.6　结论

本章探讨了能量约束的无线传感器网络的物理层特点以及 AM 和 ASAM 的实施问题。详细解释了链路自适应反馈系统模型的主要组成部分，并讨论了几个基于 AM 的技

术，评估了自适应协议在不同网络中的能耗。开发了一种ASAM算法并纳入链路自适应策略，该算法与AM进行了比较。此外，计算了多跳中继网络的最优功率分配值，比较了几个链路自适应协议之间最大的网络生命周期。

仿真结果表明，离散速率连续功率自适应协议可以有效地控制系统所有节点共享有限可用能量的能量约束网络的能耗。结果表明，AM提高了数据速率，是一种有前途的技术，而AS显著提高了功率效率。两者的结合可降低网络能耗，从而提高系统工作生命周期。对点对点通信和多跳网络的性能进行了研究。将多跳中继网络的功率分配方案与其他链路自适应协议进行了比较，并获得了满意的结果。

此外，结果还显示AM、AMI和ASAM的各种传输参数对能耗具有不同的影响。AM的信道衰落条件对能耗具有很大的影响，特别是在低SNR区域。然而，对于ASAM，信道衰落条件和平均SNR值都对节点生命周期有显著影响。此外，ASAM中高的调制阶段改善节点生命周期比AMI和AM更多。对双链路多跳中继网络模型进行了研究，并探讨了功率分配和能耗之间的关系。通过采用最优功率分配算法，可以大大提高多跳中继网络的网络工作生命周期。

参考文献

1. S. Phoha et al., *Sensor network operations*. Hoboken, N.J., Wiley; IEEE Press, 2006.
2. S.G. Cui et al., "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4, September 2005, pp. 2349–2360.
3. T. He et al., "Achieving real-time target tracking using wireless sensor networks," *Proceedings of the 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2006, pp. 37–48.
4. H. Karl et al., *Wireless Sensor Networks: First European Workshop, EWSN 2004, Berlin, Germany, January 19–21, 2004, proceedings*. New York: Springer-Verlag, 2004.
5. T. Yan et al., "Design and optimization of distributed sensing coverage in wireless sensor networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems* 7, 2008.
6. I.F. Akyildiz et al., "Wireless multimedia sensor networks: A survey," *IEEE Wireless Communications* 14, December 2007, pp. 32–39.
7. V. Rajaravivarma et al., "An overview of wireless sensor network and applications," *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory*, 2003, pp. 432–436.
8. A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
9. T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, Prentice Hall PTR, 2002.
10. J.G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2008.
11. M.K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. Hoboken, Wiley-Interscience, 2005.
12. M.S. Alouini and A.J. Goldsmith, "Adaptive modulation over Nakagami fading channels," *Wireless Personal Communications* 13, May 2000, pp. 119–143.

13. H. Matsuoka et al., "Adaptive modulation system with variable coding rate concatenated code for high quality multi-media communication systems," *1996 IEEE 46th Vehicular Technology Conference, Proceedings, Vols. 1–3*, 1996, pp. 487–491.
14. H. Alasady and M. Ibnkahla, "Adaptive modulation over nonlinear time-varying channels," *European Transactions on Telecommunications* 18, November 2007, pp. 685–692.
15. A.J. Goldsmith and P.P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information," *IEEE Transactions on Information Theory* 43, November 1997, pp. 1986–1992.
16. J.K. Cavers, "Variable-rate transmission for Rayleigh fading channels," *IEEE Transactions on Communications* Co20, 1972, p. 15.
17. J.F. Hayes, "Adaptive feedback communications," *IEEE Transactions on Communication Technology* Co16, 1968, p. 29.
18. S.T. Chung and A.J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Transactions on Communications* 49, September 2001, pp. 1561–1571.
19. W.T. Webb and R. Steele, "Variable-rate QAM for mobile radio," *IEEE Transactions on Communications* 43, July 1995, pp. 2223–2230.
20. A.J. Goldsmith and S.G. Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Transactions on Communications* 45, October 1997, pp. 1218–1230.
21. D.L. Goeckel, "Adaptive coding for time-varying channels using outdated fading estimates," *IEEE Transactions on Communications* 47, June 1999, pp. 844—855.
22. J. Hagenauer, "Rate-compatible punctured convolutional-codes (RCPC codes) and their applications," *IEEE Transactions on Communications* 36, April 1988, pp. 389–400.
23. M. Rice and S.B. Wicker, "Adaptive error control for slowly varying channels," *IEEE Transactions on Communications* 42, February–April 1994, pp. 917–926.
24. B. Vucetic, "An adaptive coding scheme for time-varying channels," *IEEE Transactions on Communications* 39, May 1991, pp. 653–663.
25. T. Ue et al., "Symbol rate and modulation level-controlled adaptive modulation TDMA TDD system for high-bit-rate wireless data transmission," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 47, November 1998, pp. 1134–1147.
26. A. Ghosh et al., "Broadband wireless access with WiMax/802.16: Current performance benchmarks and future potential," *IEEE Communications Magazine* 43, February 2005, pp. 129–136.
27. Q.W. Liu et al., "Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 3, September 2004, pp. 1746–1755.
28. F. Peng et al., "Adaptive modulation and coding for IEEE 802.11n," *2007 IEEE Wireless Communications & Networking Conference, Vols. 1–9*, 2007, pp. 657–662.
29. J.L.C. Wu et al., "An adaptive multirate IEEE 802.11 wireless LAN," *15th International Conference on Information Networking, Proceedings*, 2001, pp. 411–418.
30. T.H. Chan, M. Hamdi, C.Y. Cheung, and M. Ma, "A link adaptation algorithm in MIMO-based WiMAX systems," *Journal of Communications* 2, August 2007, pp. 16–24.
31. B. Classon et al., "Channel coding for 4G systems with adaptive modulation and coding," *IEEE Wireless Communications* 9, April 2002, pp. 8–13.

32. A. Furuskar et al., "EDGE: Enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution," *IEEE Personal Communications* 6, June 1999, pp. 56–66.
33. S. Nanda et al., "Adaptation techniques in wireless packet data services," *IEEE Communications Magazine* 38, January 2000, pp. 54–64.
34. S. Otsuki et al., "Square-QAM adaptive modulation/TDMA/TDD systems using modulation level estimation with Walsh-function," *Electronics Letters* 31, February 2, 1995, pp. 169–171.
35. A.Y. Alemdar, "Link adaptation for energy constrained networks," MSc thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University, Kingston, 2008.
36. A. Chandrakasan et al., "Design considerations for distributed microsensor systems," *Proceedings of the IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conference*, 1999, pp. 279–286.
37. J.M. Rabaey et al., "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *Computer* 33, July 2000, p. 42.
38. B.M. Sadler, "Fundamentals of energy-constrained sensor network systems," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 20, August 2005, pp. 17–35.
39. Y.W. Hong et al., "Cooperative communications in resource-constrained wireless networks," *IEEE Signal Processing Magazine* 24, May 2007, pp. 47–57.
40. Y.T. Hou et al., "On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4, September 2005, pp. 2579–2590.
41. R. Min et al., "Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications* 9, August 2002, pp. 28–39.
42. S.C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*. Boston: Artech House, 2002.
43. K. Akkaya and M.F. Younis, "Survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks* 3, 2005, pp. 325–349.
44. K. Sohrabi et al., "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications* 7, October 2000, pp. 16–27.
45. C. Intanagonwiwat et al., "Directed diffusion for wireless sensor networking," *IEEE Transactions on Networking* 11, February 2003, pp. 2–16.
46. J. Van Greunen et al., "Adaptive sleep discipline for energy conservation and robustness in dense sensor networks," presented at the 2004 IEEE International Conference on Communications, 2004.
47. D.P. Van Greunen J., A. Bonivento, J. Rabaey, K. Ramchandran, A.S. Vincentelli, "Adaptive sleep discipline for energy conservation and robustness in dense sensor networks," presented at the IEEE International Conference on Communications, 2004.
48. J.M. Rabaey et al., "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *Computer* 33, July 2000, p. 42.
49. J.M. Kahn et al., "Emerging challenges: Mobile networking for 'Smart Dust,'" *Journal of Communications and Networks* 2, September 2000, pp. 188–196.
50. P. Agrawal and N. Patwari, "Correlated link shadow fading in multi-hop wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8, August 2009 pp. 4024–4036.
51. N. Patwari and P. Agrawal, "Effects of correlated shadowing: Connectivity, localization, and RF tomography," *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Proceedings*, 2008, pp. 82–93.

52. M. Ilyas and I. Mahgoub, *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005.
53. J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wireless Communications* 11, December 2004, pp. 6–28.
54. A.S. Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2003.
55. V.K.N. Lau and Y.-K.R. Kwok, *Channel-Adaptive Technologies and Cross-Layer Designs for Wireless Systems with Multiple Antennas: Theory and Applications*. Hoboken, John Wiley, 2006.
56. D. Wagner and R. Wattenhofer, *Algorithms for Sensor and Ad Hoc Networks: Advanced Lectures*. Berlin: Springer, 2007.
57. W. Ye et al., "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *IEEE Infocom 2002: The Conference on Computer Communications, Vols. 1–3, Proceedings*, 2002, pp. 1567–1576.
58. D.P.J. Van Greunen, A. Bonivento, J. Rabaey, K. Ramchandran, A.S. Vincentelli, "Adaptive sleep discipline for energy conservation and robustness in dense sensor networks," presented at the IEEE International Conference on Communications, 2004.
59. R. Jurdak et al., "Radio sleep mode optimization in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 9, July 2010, pp. 955–968.
60. C. Park et al., "Battery discharge characteristics of wireless sensor nodes: An experimental analysis," *2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2005, pp. 430–440.
61. E. Casilari et al., "Modeling of current consumption in 802.15.4/ZigBee sensor motes," *Sensors* 10, June 2010, pp. 5443–5468.
62. M. Alnuaimi et al., "Performance evaluation of IEEE 802.15A physical layer using MATLAB/Simulink," *2006 Innovations in Information Technology*, 2006, pp. 156–160.
63. W.T.H. Woon and T.C. Wan, "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 wireless multi-hop networks: simulation and testbed approach," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing* 3, 2008, pp. 57–66.
64. F.M. Al-Turjman et al., "Connectivity optimization for wireless sensor networks applied to forest monitoring," *2009 IEEE International Conference on Communications, Vols. 1–8*, 2009, pp. 285–290.
65. X. Zhao, *Energy Constrained Link Adaptation for Multi-hop Relay Networks*, MSc. diss., Queen's University, Canada, 2010.
66. X. Zhao, E. Bdira, and M. Ibnkahla, "Adaptive modulation and MAC protocols for wireless sensor networks," submitted for publication, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, submitted for publication, December 2011.

第4章 无线多跳网络 QoS 路由的跨层研究

4.1 概述

多跳网络中的热门类别包括 WSN、MANET（Mobile Ad hoc Network，移动专用网络）、WMN（Wireless Mesh Network，无线网状网络）和 VANET（Vehicular Ad hoc Network，车载专用网络）。在 WSN 中，传感器节点部署在目标区域中测量特定的特性，如温度或压力，并将测得的信息中继到基站进行处理。传感器节点可以大量部署，并能够自主运行，无须人工干预。MANET 中的节点具有足够的处理和联网能力，可以自主地连接在一起，并运行各种应用程序。在 WMN 中，节点具有同 MANET 类似的功能，但通常是利用一些基础设施，主要是为大量的无线设备提供因特网服务。另外，VANET 车辆装备了可用于交换诸如话务强度和碰撞警告信息或用于常规数据通信的收发器。

除了极其普及的多跳网络，无线用户越来越多地要求支持更具挑战性的应用，如视频流和 VoIP（Voice - Over Internet Protocol，互联网语音协议）。这种应用的高效运行需要某些 QoS（Quality of Service，服务质量）参数支持，如带宽、端到端的时延、PLR（Packet Loss Ratio，丢包率）和偏差。然而，尽管进行了广泛的研究工作，在多跳网络中保证令人满意的 QoS 水平的目标实现仍然遥遥无期。一般来说，由于多跳网络的高度动态性，严格保证通信会话整个持续时间内可靠的 QoS 参数很难实现。相反，研究人员努力提高适度的 QoS 支持。这意味着，尽管参数在通信会话开始时可以确保，但却可能有所需参数违反其阈值的时段。

所有类型的多跳网络通用的 QoS 技术支持框架是不存在的。不同类型的多跳网络会施加不同的挑战和制约因素，这些必须在协议设计时加以考虑[1-3]。为了准确地研究 QoS 技术支持背后的挑战，并由于 QoS 应用的迫切需求，我们介绍了力求支持不同类型多跳网络 QoS 应用的路由设计的最新成果调查。我们选择了四种类型的多跳网络：MANET、WMN、WSN 和 VANET。图 4.1 显示了本章中考虑的多跳网络。这些都是最具潜力的多跳网络，也是大多数研究者的目标。此外，他们还提供了关于其他类型多跳网络的 QoS 支持的洞察，如蜂窝多跳网络。

本章的关键环节之一是主要考虑采用跨层设计的路由协议，现在它已经成为无线研究人员的一个基本的设计理念。跨层设计是为提高网络的整体性能，参数在层与层之间进行交换的过程。

跨层设计得到研究界越来越广泛重视的原因是，现实中，网络中一个层上的变化可能对其他的层产生深远的影响。例如，功率自适应可能导致链路的创建或删除，从而改变整个网络的拓扑结构，可能对网络层的路由决策产生重要影响。MAC 的调度发送会

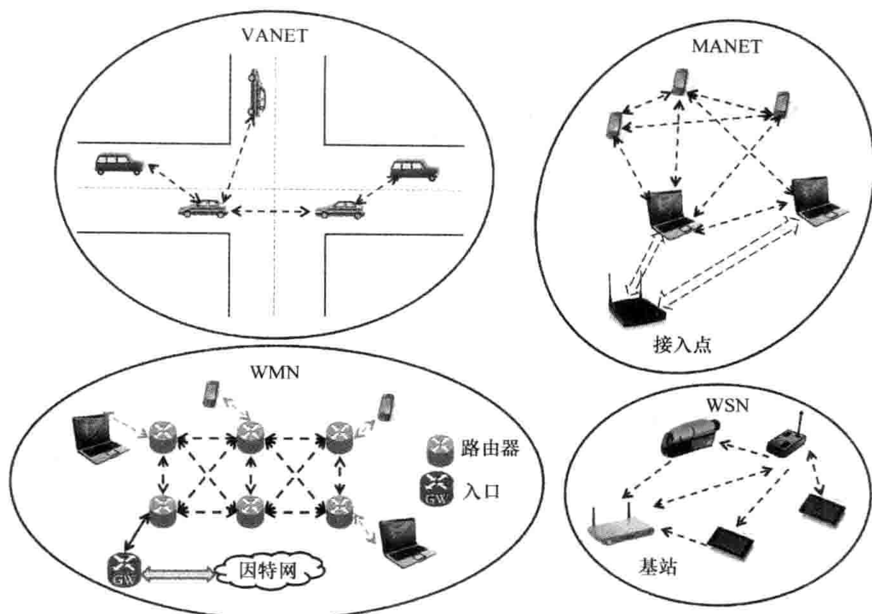


图 4.1　无线多跳网络的例子

影响到 PHY 的干扰电平。传输层的流量控制甚至会影响网络整体的拥塞程度[4]。因此，跨层设计可能对多跳网络的 QoS 支持产生深远的影响。跨层设计的例子包括将网络层的路由与 MAC 的调度和呼叫准入以及 PHY 的功率自适应相结合以控制干扰，或者将 MAC 的信道分配与 PHY 的自适应调制相结合以优化每一个链路的无线资源。

本章通过审查几种网络类型及其中固有的挑战，从一个广泛的角度考虑 QoS 的技术支持。这样的调查对于说明为什么还没有所有多跳网络的 QoS 总体框架并显示不同路由协议适合的条件是非常重要的。还讨论了如果设计了相关的框架或如果实现了不同网络之间的互操作性时所需要考虑的挑战。

本章的剩余部分组织如下：4.2 节强调了设计 QoS 路由协议时应包括的主要设计考虑。4.3 节审视了一些代表当前不同类型多跳网络的 QoS 路由设计研究水平的跨层方法。4.4 节比较了被调查的协议，强调了其优点和缺点，4.5 节介绍了有望提高网络性能的公开挑战和未来的研究方向。最后，4.6 节介绍了本章的一些结论性评述。

4.2　设计挑战与注意事项

在设计 QoS 路由协议的过程中，有多个必须要考虑的因素。这些因素在很大程度上取决于支持的应用和网络自身的性质。本节重点是强调 QoS 路由协议设计的一些重要挑战和注意事项。

4.2.1 QoS 指标

不同的应用需要无线信道不同资源的支持。一般来说，在多跳网络中，这些资源需要端对端的支持，即从信源到目标节点，可能跨越多个中间节点。大多数应用需要的令人满意的主要性能指标有[5]：

1）最小吞吐量：这可能不一定仅指 PHY 的带宽资源或原始数据速率，也指需要 MAC 保障的数据包成功发送的平均速率。吞吐量在视频和语音应用或者需要传送大量信息的任何应用中是首要的。

2）最大时延：主要由传播时延加上排队和处理时延组成。由于中继信息安全的关键性质，这个指标在 VANETs 中显得尤为重要。

3）最大时延偏差：通常定义为时延的上限和可能的最小时延（通常由传播时间和包长度定义）之间的差异。在要求恒定的信息流量的应用如视频流中偏差是很重要的。

4）最大丢包率（PLR）：定义为显著降低传输数据完整性之前可能会丢失的数据包的最大比率。高的 PLR 可能是由拥塞或差的信道条件造成的，对大多数应用很重要。

4.2.2 设计挑战

协议设计的挑战主要取决于网络的性质。因此，根据网络类型对挑战分类[6]。

1）MANET 的挑战：MANET 中的节点通常有足够的能量和处理能力。然而，它们苦于缺乏集中控制。诸如资源管理、接入控制和调度的任务不得不以分布式的方式执行，这可能会导致性能不够理想。由于争夺无线媒介引起的节点之间的干扰也是一个主要的问题。可分为互通干扰和内部干扰。互通干扰是不同的数据之间的干扰，而内部干扰是同一个数据流多个节点之间的干扰。干扰也是以分布式的方式进行管理。MANET 的跨层研究包括功率、数据速率、调度和接入控制任务的联合优化。

2）WMN 的挑战：WMN 的节点也具有足够的能量和处理能力，并同 MANET 共有一些挑战，特别是干扰。然而，一些基础设施的存在意味着一些任务可以以集中的方式进行管理。由于其典型的大尺寸，可扩展性是 WMN 的一个主要挑战。协议必须能够考虑具有最小可能复杂性的大量的节点。为避免由于通常出现在 WMN 中的繁重的话务负荷而导致的拥塞区域，拓扑控制也很重要，这就是为什么路由和链路调度的联合设计成为一个流行的跨层研究方向的原因。网络规划和部署对整体性能也非常关键，因为它们影响负载均衡和未来的网络扩展。

3）VANET 的挑战：流动性高是 VANET 大多数挑战的主要原因[7]。这将导致拓扑结构是高度动态的，其中链接超过几秒钟就可能是无效的。这也意味着，网络可能会遭受频繁的分隔，节点的子集可能会成为孤立的。不同的路由考虑也要包含在路由协议中。例如，由于受道路的约束，车辆的流动方式是确定的。此外，该协议必须考虑可能会出现在不同道路上的不同的通信环境（例如，高速公路上的通信相比市中心的通信有不同的要求）。时延通常是 VANET 应用要求的主要的 QoS 指标，必须成为路由协议的主要关注点。VANET 大多数的跨层设计技术使用 GPS 设备来辅助路由。VANET 的节

点也有足够的能量，通常放松了对存储能力和设备大小的限制。这意味着为提高性能，VANET 可以采用更大的天线。

4）WSN 的挑战：由于传感器节点大小的严格要求，它们通常具有有限的能量、存储和处理能力。WSN 协议设计的主要挑战是能量效率。WSN 网络使用传感器设备上的小电池，通常需要几个月保持正常运行，无须人工干预。传感器网络也以相对较低的数据速率运行。这些特性使 WSN 的 QoS 成为极具挑战性的任务。QoS 路由协议必须简单（避免高复杂运行），并应避免传输浪费和不必要的开销，因为传输被认为是网络中最大的能耗。负载均衡也需要考虑，以避免任何节点子集的过量使用。WSN 的跨层协议通常考虑剩余电池水平，并可能考虑诸如来自 MAC 的争用或路由过程中来自 PHY 的地理信息之类的参数，以确保能量效率。

表 4.1 总结了这些挑战，强调了应对这些挑战的主要的跨层方向。

表 4.1　多跳网络的挑战和跨层解决方案

	MANET	WMN	VANET	WSN
考虑因素与挑战	• 缺乏集中控制 • 互通干扰和内部干扰 • 分布式资源管理	• 干扰管理 • 可扩展性 • 链路调度 • 拓扑控制 • 高流量负载	• 动态拓扑 • 网络分隔 • 未知的网络规模 • 确定性的流动方式 • 不同的路由需求	• 有限的能量 • 有限的存储和处理能力 • 有限的带宽
流行的跨层研究方法	• 联合路由和接入 • 联合路由和功率控制 • 联合路由和调度	• 联合路由和调度 • 联合路由和准入控制 • 联合路由和拓扑控制	• 地理路由 • 联合路由和拓扑控制	• 联合路由和拓扑控制 • 联合路由和调度 • 地理路由

4.2.3　网络资源和性能指标

有许多评估路由协议性能的方法。可以通过直接测量应用要求的 QoS 指标，或通过其他能够反映协议如何运作的方式。本节介绍每层可用的主要网络资源，讨论每层通常采用的性能指标[5-6]。

1）PHY 资源和性能指标：这一层的资源包括可用带宽或信道容量（很大程度上取决于信道条件和干扰）及剩余的电量。带宽通常用信道的平均利用率（信道忙保持多久）来衡量，或使用干扰模型。这些模型可以基于信号与干扰加噪声比（SINR）的测量或能识别同时工作的链路的链路冲突曲线图。此外，节点位置和流动等级在 PHY 测量，可能是路由决策的重要指标。端到端的时延、BER、信噪比和电池利用率通常用于评估 PHY 的性能。

2）MAC 的资源和性能指标：缓冲空间是 MAC 最重要的资源之一，因为它对时延和拥塞水平有深远的影响。链路吞吐量（每个节点的吞吐量）也在 MAC 测量，因为该层负责确定数据包接收的成败。某些路由协议通常考虑争用的可能性，它通常通过对一

段时间内丢失数据包的数量进行计数来测定。链路可靠性、稳定性和生命周期也在 MAC 测量，并对 PLR 有直接影响。

3）网络层资源和性能指标：拥塞通常在网络层测量，因为它需要整体网络资源的视图。同样的，总吞吐量（网络总吞吐量）和网络的生命周期也需要一个网络视图，应在网络层测量。

4）上层性能指标：QoS 路由协议往往是从应用本身的角度进行评估。例如，会话阻塞/掉线率和错误舍弃率是评估准入控制协议的一些重要方法。大的会话 - 阻塞率意味着该协议可能过于保守，而大的会话 - 掉线率意味着该协议准入的会话可能过多。从用户或应用的角度来测量路由协议的性能是非常重要的，尤其是对市场或商业目的。

最后，值得一提的是，所有多跳网络的动态性质和大量的可能影响网络性能的注意事项及其相互作用，通常难以保证通信会话整个时段的 QoS 参数。因此，评估任何协议的性能，更实际的是考虑某一指标的运转中断。为了说明问题，假设有图 4.2。正如图中所示，应用程序定义某一时段 γ，如果 QoS 参数下降到低于阈值的持续时间大于 γ，应用程序就丧失了完整性产生中断。但是，大多数应用可以容忍期间 QoS 参数在仍能维持所发送信息完整性的同时违反阈值。

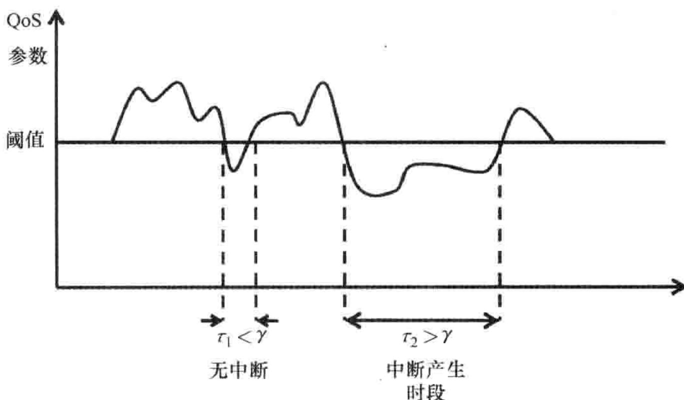


图 4.2 QoS 参数的中断期

4.3 多跳网络 QoS 路由协议的分类

本节介绍不同类型多跳网络支持的最新的一些 QoS 协议，根据它们所针对的网络类型进行分类。

4.3.1 MANET 中的 QoS 路由

MANET 是最流行的多跳网络类型之一，主要归功于广泛实施的无线设备 IEEE 802.11 标准（Wi - Fi）。早期 MANET 路由协议的研究关注路径发现任务，通过利用路由指标选择路径。在跨层设计中联合层与层之间的指标以提高性能。诸如 AODV（ad hoc On - demand Distance Vector，特设按需距离矢量）路由[8]、DSR（Dynamic Source

Routing，动态源路由)、DSDV（Destination - Sequence Distance Vector，目的序列距离矢量）路由[9]等的协议仅仅选择从源节点到目的节点的最短路径。ETX（Expected Transmission Count，预期传输计数）指标[10]通过利用 MAC 成功发送和接收的数据包数量的信息，选择能使数据包投送率最大化的路径。另外，WCETT（the Weighted Cumulative Expected Transmission Time，加权累计预期传输时间）指标[11]通过利用 PHY 关于信道状态的信息，选择具有最大带宽的路径。

然而，最近的研究[12]表明，联合指标可能并不能获得 QoS 支持范围内的最佳结果。几个指标相加、相乘或相除导致的代价是仅能反映这些指标的联合，却并不能反映每个单独指标本身。可以利用图 4.3 进行阐述，其中显示了在源节点 S 和目的节点 D 之间三种可能的路径。在图 4.3a 中，时延和带宽指标合并成单个成本指标。因此，不管 QoS 应用需要什么，每次都选择具有最少成本的路径。在图 4.3b 中，每条路径的每个 QoS 参数分别计算，这就为路由决策提供了更多信息。例如，如果应用需要具有最小时延的路径，则选择第一条路径，而如果需要一个同时支持低时延和高带宽的路径，就选择第三条路径。因此，单独计算路由指标会导致更好的 QoS 支持。

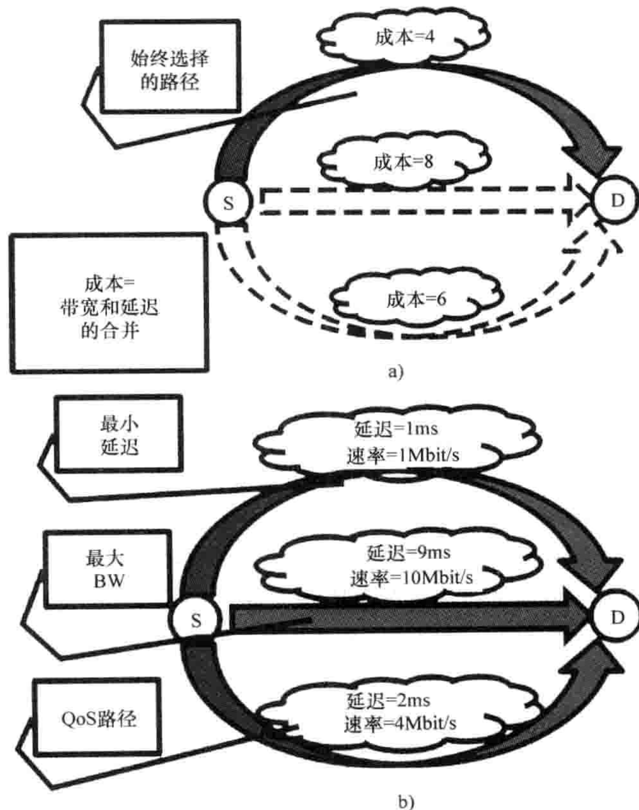


图 4.3　多跳网络的路径选择

a）合并的链路指标　b）独立的链路指标

除了路径发现和准确的资源评估，为了根据可用的无线资源控制传输并减少干扰，MANET 中 MAC 的呼叫准入协议特别重要，是 QoS 支持的一个关键挑战。呼叫准入的主要挑战是要考虑每个节点载波侦听范围内的可用资源，而不仅仅是在传输或本地范围内的。这对于确保新接入的会话不会降低当前的会话性能而言是必需的。

1. 具有竞争意识的准入控制协议

参考文献［13］中探索了路由和呼叫准入的结合，提出了 CACP（Contention - aware Admission Control Protocol，具有竞争意识的准入控制协议）。CACP 是网络层、MAC 和 PHY 之间的跨层方案，其中载波侦听范围内的干扰在资源评估中考虑并被用于 MAC 的呼叫接入。新数据流的准入被分为两个阶段。第一阶段包括路径发现和每个节点的本地资源（传输范围内）评估，利用诸如 DSR 的源路由协议来完成。网络上充斥着 RREQ（Route Request，路径请求）数据包。当收到 RREQ 数据包后，每个中间节点测量其本地的可用带宽。这通过监测信道的被占时刻来完成。如果本地带宽大于准入会话需求，节点将只转发 RREQ 数据包。当 RREQ 到达目标节点后，如果沿途每个节点有足够的本地资源，它将只发送 RREP（Route Reply，路由应答）数据包。如果目的节点接收多个 RREQ，将缓存一段时间并在一个路径上发送 RREP（如果其相应的路由有更高的带宽，可以发送更多的 RREP)。

CACP 的第二阶段发生在 RREP 阶段，期间核实沿线每个节点载波侦听范围内的资源。CACP 提出了三种方法来执行此任务。第一种方法，被称为多跳 CACP，发送查询数据包到所有在载波感应范围内的节点，询问其带宽使用率。该方法中的载波侦听范围被假定为两跳的宽度。收到查询消息的每个节点使用查询数据包内的信息，计算新会话准入时将消耗的带宽。如果没有容纳新会话的可用带宽，就发送回复，路径将被拒绝。如果 RREP 到达源节点，信源就会知道所有的中间节点都有足够的资源，并且新准入的路径不会违背其他活跃会话的需求。

CACP 提出的第二个呼叫准入方法被称为功率 CACP。该方法中查询数据包以更高的发射功率发送，能够到达载波侦听范围内的所有节点。因此，数据包到达要查询的所有节点只需要一次跳跃。由于在多跳 CACP 中，只有当 RREP 传播返回到源节点时，准入才会发生，功率 CACP 比多跳 CACP 需要更少的开销，但需要修改一些硬件以支持发射功率的增加。在 CACP 提出的第三种被称为 CACP - CS 的算法中，节点 A 的准入是通过使用覆盖所有节点载波侦听范围的检测阈值（该阈值被称为载波侦听范围的邻值)，监测节点 A 载波侦听范围内的可用带宽来执行。该方法不需要额外的开销或硬件修改，但没有多跳 CACP 和功率 CACP 准确。三个准入算法如图 4.4 所示。

虽然每个网络将只使用上述所提出的三种方法之一，图 4.4 对它们都进行了分析以进行比较。CS - x 表示载波侦听范围内的节点 x。因此，节点 A 相邻的载波侦听范围覆盖了 CS - $\{A, B, C, G\}$。CACP 的主要缺点是过于保守。该算法可能包括节点载波侦听范围以外将要准入的节点。然而，据我们所知，CACP 是首个在准入过程中考虑载波侦听范围内资源的协议，这就是为什么本节详细解释它的原因。

参考文献［14］提出了 CACP - CS 的修正，归入 RAC（Routing and Admission Con-

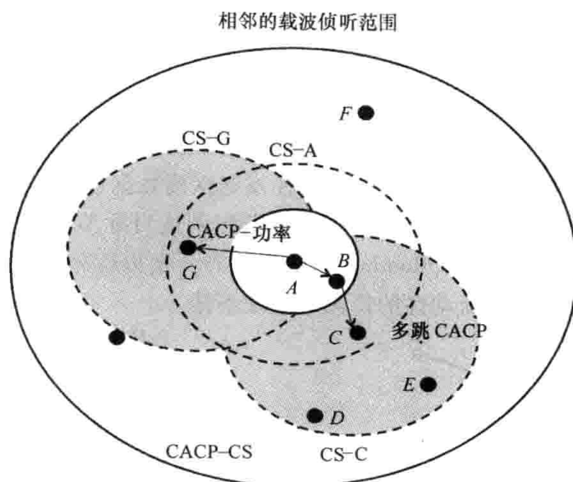


图 4.4　CACP 的准入算法

trol，路由和准入控制)，假设相邻载波侦听范围内的传输与载波侦听范围内要接入节点的传输是相互独立的。因此，可用带宽估计不像 CACP - CS 那样保守。RAC 还假设，不同链路可以支持不同的数据传输速率，并使用允许快速恢复路径的路径发现方法，而这在 CACP 中是不可用的。

2. 自适应准入控制

为了解决 CACP 的保守性，并提供更准确的呼叫准入，提出了名为 AAC（Adaptive Admission Control，自适应准入控制）的跨层协议[15]。该协议使用 MAC 和 PHY 的信息提供积极的资源发现，并在 MAC 执行准入控制。周期性的 HELLO 数据包用来播报每个节点测量的可用带宽（通过监测信道的繁忙时间，如同 CACP 中一样)。尽管 HELLO 数据包只发送到每个节点的单跳范围，带宽信息汇总到每个 HELLO 消息，这样每个节点都将获悉载波侦听范围内其他节点的带宽信息。因此，当会话需要接入时，节点已经知道每一跳的可用带宽。AAC 的可用带宽被定义为所有干扰节点的最小带宽。

AAC 的路由协议还包括处理拥塞和流动性的方式。每当在一个特定的节点发生拥塞时（例如，如果它在多个会话中被用于传送数据)，或者移动性使节点进入正在进行的会话的干扰范围，违背了 QoS 阈值的节点将选择使会话消耗最多的资源，并通知该会话的源节点一段时间内暂停发送。这将释放用于其他会话的资源，使即将掉线的会话数量降至最低。然而，如果拥塞不减少，暂停的会话可能不再接入。

3. 干扰感知 QoS 路由

参考文献［16］探究了另一个研究方向，提出了 IQRouting（Interference - Aware QoS Routing，干扰感知 QoS 路由)。利用网络层和 PHY 之间的跨层交互以制订链路冲突图，描绘网络中链路之间的相互干扰，并在 MAC 进行准入控制。链路冲突图中的节点代表网络中的链路，图中链路连接的边相互干扰（在干扰范围内)。图论中一个完整的子图被称为子集，因而子集中所有的链路之间互相干扰。冲突图和子集的概念可以使用

图4.5说明。

图4.5中，链路{A,B,F}、{A,B,E}、{B,E,F}、{A,E,B,F}是子集，因而它们都互相干扰。IQRouting在整个网络中播送周期性的控制消息以发现网络的拓扑结构和子集。带宽消耗信息也是定期播送。源路由协议用于发现一些候选路径，并测试每个路径的资源以寻找最佳路径。通过每个候选路径发送探测数据包以检查子集约束。累积的带宽被定义为所有链路的最小带宽。当探测数据包到达目标节点时，对它们进行比较，并选择具有最大带宽的那个。IQRouting需要大量的开销以保持控制信息、建立链路冲突图和执行准入，因此在高流动性的情况下表现不佳。

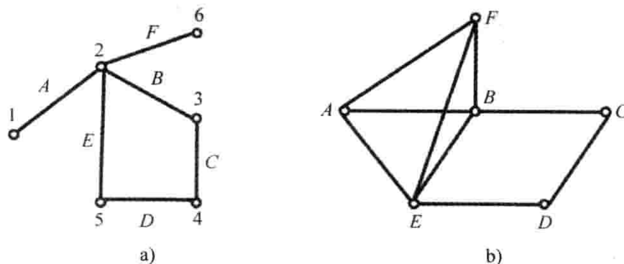


图4.5 冲突图表示的链路之间的相互干扰模型
a）网络连接图 b）冲突图

4. 基于干扰的公平呼叫准入控制

参考文献［17］提出了跨层路由协议，被称为iCAC（interference - based fair Call Admission Control，基于干扰的公平呼叫准入控制），是MAC执行呼叫准入时为数不多的考虑公平的协议之一。信道繁忙时间在PHY进行监测，以确定每个节点的可用资源。iCAC的主要优点是在载波侦听范围内所有节点之间平均分配带宽。节点使用周期性的HELLO数据包以保持邻居表并通报带宽使用率。然而，为减少开销，HELLO数据包只每5s播送一次。当节点需要许可新的数据流进入时，就使用来自HELLO数据包的信息以确定是否有足够可用的带宽，并将带宽分配通知给当前忙于通信会话的载波侦听范围内的所有节点。iCAC假定所有节点都有能够到达载波侦听范围内所有节点的预留的发射功率。

参考文献［17］的另一个重要贡献是iCAC如何认定信道繁忙。一般只有当接收到的功率大于载波侦听阈值时才认为信道忙，与之不同的是，参考文献［17］的研究识别出实际上这是信道繁忙时间的上界。节点繁忙时间下界的计算是考虑到只有当节点发送或接收时才认为信道忙。iCAC使用这些界限来确定干扰信号是位于节点的传输距离内或位于其载波侦听范围内。每个节点使用接收阈值（低于不能接收数据包的功率电平）和载波侦听阈值来感测媒介。如果认定信道使用接收阈值比使用载波侦听阈值更空闲，那么位于载波侦听范围内的干扰比发送范围内的更多。

有趣的是，针对MANET提出的QoS支持的想法也可以在WMN中采用，由于两个网络之间的相似之处，反之亦然。两个网络的节点具有足够的能量和网络功能，因而可以支持挑战性的应用。WMN的QoS支持的思想在下一节中介绍。

4.3.2 WMN 中的 QoS 路由

WMN 中的话务需求可能很高，类似于 MANET 的情况。其实，早期提出的 MANET 的协议，如 AODV 和 WCETT，也被用于 WMN 中。然而，WMN 和 MANET 之间的主要区别是，WMN 依赖可以进行某些集中式管理操作的一些基础设施，这对于控制干扰可能是非常有价值的。WMN 尺寸通常也大于 MANET，针对支持较大话务需求的情形。WMN 的流动性通常也低于 MANET。本节关注专为 WMN 设计的协议。

1. QoS 路由和分布式调度

由于高流量需求，为避免瓶颈并确保所需的 QoS 级别，将网络层的路由与 MAC 的调度相结合是 WMN 中一个非常流行的跨层研究方法。参考文献［18］利用外延的网络层、MAC 和 PHY 之间的跨层交互，提出了支持多种 QoS 指标的 QRDS（QoS Routing and Distributed Scheduling，QoS 路由和分布式调度）的框架。由于 WMN 针对各种各样的应用支持，QRDS 包括支持吞吐量、时延和 PLR 的 QoS 指标的说明。基于每个 QoS 指标的不满意比率定义了避免瓶颈的效用函数。这些效用函数定义为：

1）时延不满意比率是通过路径实际测量时延与所要求的 QoS 时延之间的比率。

2）吞吐量不满意比率是所要求的 QoS 吞吐量与路径测量的瓶颈吞吐量（所有链路的最小吞吐量）之间的比率。

3）PLR 不满意比率定义为路径所有链路单跳的 PLR 的乘积与所要求的 QoS 的 PLR 之间的比率。

路径发现过程中在 PHY 评估资源，由网络层选择效用函数最小化的路径。为了保证 QoS 参数，路径发现过程的每跳使用储备的资源，储备的余量用于计算估测误差。提出的 MAC 的调度器将参数即将偏离的数据流置于优先。效用指标，类似于不满意比率，也被定义为 MAC 的节点负责为几个活跃的会话转发数据包的情形。每当数据包需要转发，调度程序将激活 QoS 指标最接近其阈值的会话。这就确保了调度器阻止所有会话 QoS 指标的偏离。仿真结果表明，该算法的循环调度优于经典的 AODV 算法。

2. 鲁棒性路由和调度

参考文献［19］专注于通信信息不准确的问题，其中提出了 RRS（Robust Routing and Scheduling，鲁棒性路由和调度）算法。该算法主要针对集中控制器可用的网络，是网络层、MAC 和 PHY 之间跨层设计框架的代表。即使在多变的通信条件下，该协议仍然实现了最坏情况下的最优性能，这一事实验证了集中控制器的使用。PHY 使用了基于链路冲突图或 SINR 测量，识别可以同时运行的链路的干扰模型。

集中控制器在解决了所有流量最大拥塞等级最小化的 LPP（a Linear Programming Problem，线性规划问题）之后，接收数据流的请求，并传输所有节点到达 MAC 的时间表。制定了包含所有通信请求的 TM（Traffic Matrix，通信矩阵），提出了 RRS 的两个变体。首个变体没有提供通信知识，TM 中所有条目可以选取介于 0 和∞之间的值。在这种情况下，算法考虑所有可能的 TM，发现了实现最坏情况下最小拥塞的一个路由—调度对。RRS 的第二个变体有一些可用的通信知识，TM 的一些条目可能是已知的。这

样，LPP 引入了更多的约束，限制了搜索空间。然后，使用定制的 LPP 寻找最优的路由—调度对。该算法也最大限度地减少了开销，因为只要实际通信在评估范围内，时间表不需要重新计算和重新分配。只要时延也是必需的指标，LPP 就增加了约束以限制从源节点到目标节点的跳数。通过限制跳数，RRS 保证了可能产生的时延的上限。

3. 使用精确带宽估计的准入控制算法

参考文献［20］提出了一个不同的研究方向，基于网络层和 MAC 之间的跨层设计，提出了全面的 ACA（Admission Control Algorithm，准入控制算法）。由于预期的高流量负载，WMN 中的接入控制也特别重要。ACA 的优点是它可以以分布式的方式来实现，并且不需要很大的开销。网络中的每个节点维持着可用信道带宽的估计值。带宽通过监视 MAC 反映信道利用率的信道忙碌比率来估计。然而，ACA 在测量可用带宽的同时，考虑隐藏的节点问题。传统的带宽估计机制假设：RTS（Request To Send，请求发送）数据包接收成功的概率与成功接收数据包的概率相同。只要隐藏的终端问题存在，成功接收的 RTS 包可能无法保证数据包的成功接收。参考文献［20］通过分别考虑 RTS、清除发送（CTS）、数据和确认（ACK）数据包接收的概率思考了这一问题。

总的估计的信道带宽被划分为实时（或 QoS）通信和非实时通信，其中信道的较大部分保留给实时通信。使用诸如 AODV 的反应式路由协议发现路径。路径发现后，希望初始化实时连接的节点沿着通向目标节点的路径，发送准入数据流请求，每个中间节点检查请求的带宽是否大于估计的可用带宽。如果带宽是可用的，每个中间节点将沿路径转发请求，直到到达目标节点。否则，将发送拒绝服务到源节点。当目标节点收到准入请求时，在检查了可用资源之后，会发送准入答复到源节点。

一旦有非实时连接请求，就会使用速率调整算法以避免网络拥塞。一旦用于非实时通信的可用带宽小，节点就指示以较大的时间间隔发送数据包，当有更多可用带宽时，时间间隔将减少。该算法可以确保节点间的公平性，并确保实时通信总是优先于非实时通信。

4. 使用基于竞争与自由竞争调度算法的对比

虽然调度是一个典型的 MAC 问题，但经常附加在路由协议上，因为两个问题是密切相关的。调度算法主要有两类：基于竞争的调度，如 CSMA－CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance，避免碰撞的载波侦听多址接入），以及自由竞争的调度，如 TDMA（Time Division Multiple Access，时分多址）。这些技术都有各自的优点和缺点。

CSMA－CA 具有完全分布式的优点。每个节点争用媒介，自己进行调度。没有同步要求或任何形式的节点合作[6]。然而，CSMA－CA 的主要问题是有限的节点传输和传感范围造成了干扰和隐藏的节点问题，从而降低了吞吐量。在沉重的通信负荷下，CSMA－CA 过于保守，表现不够好；尽管如此，这一机制仍然是简单和可扩展的。CSMA－CA 被许多标准使用，如 IEEE 802.11 和 802.16。

另外，TDMA 具有能处理繁重通信负荷的优点[21]。它也能实现良好的空间复用和多节点之间的公平。然而，TDMA 更适合带有集中控制器的网络，因为需要计算传输调

度并分发到一组节点。这就是TDMA更适合WMN的原因。在分布式网络中，TDMA可能需要很大的开销。

基于TDMA形成调度表的关键因素之一是使用干扰模型识别可以同时工作的链路[21]。早期的干扰模型，如链路冲突图，假设节点的覆盖区域为可能不准确的圆盘形状。参考文献［21］采用了更准确的基于SINR测量的干扰模型。

到目前为止，已经研究的网络类型具有有限的或根本没有流动性。节点的移动可能会造成拓扑结构和网络资源的变化。VANET的节点具有高的移动性，对QoS支持增加了严格的挑战，必须要慎重考虑。以下探讨VANET的QoS支持。

4.3.3 VANET中的QoS路由

虽然VANET中的节点可能有足够的能量和网络功能，但节点的高移动性可能意味着并非所有的应用都能支持。由于频繁的链路破损，被要求保持链路活跃很长时间的应用可能不能注意到所需的QoS级别。这就是为什么VANET中的路由协议必须考虑链路生命周期的原因。大多数VANET路由协议还利用来自PHY的诸如道路地图和车辆位置的地理信息。较短的路径通常是优选的，因为它们的链路较少，被认为更可靠。也可以利用交通信息，例如，如果两辆车正在同向移动，则预计它们之间的链路比反向移动车辆之间的链路生命周期更长。

VANET主要有两种操作模式，首先是V2V（Vehicle To Vehicle，车辆到车辆），第二个是V2I（Vehicle To Infrastructure，车辆到基础设施）。在V2V中，车辆直接相互通信，而在V2I中，车辆与提供因特网覆盖的路边单元通信并在车辆之间传递信息。由于VANET作为研究课题的相对新颖性，可以预见，V2V将在技术足够成熟之前首先部署，到那时公司会愿意在路边单元上投资。

参考文献［22］进行了VANET路由协议最高可实现的QoS研究。研究考虑了链路生命周期、端到端的时延、抖动和PLR等性能指标。结果表明，当前的路由协议能够满足大多数应用对时延和偏移的要求。但是，链路生命周期高度依赖于车辆速度，同时PLR取决于话务强度和信号传播的环境类型（高速公路或城市）。这意味着，如果路由在差的环境中执行，对路边单元的需求将是不可避免的，而小的区域则可以使用V2V通信覆盖。

1. 城市VANET的多跳路由

参考文献［23］基于网络层和PHY之间的跨层设计，提出了MURU（Multihop Routing for Urban VANET，城市VANET多跳路由）。MURU的主要目标是找到被认为是最稳健的、链路破损概率最小的路径。MURU假设所有车辆都配备了GPS单元。诸如道路几何形状、移动轨迹和车速等PHY信息被用于选择路径。为了解决VANET的未知网络规模的挑战，源节点首先在信源和目标节点之间使用节点的位置以及它们之间的最短轨迹规划出矩形区域。这个矩形区域被称为传播区域，用于发现路径。因此，当源节点发送RREQ数据包时，只允许传播区域内的节点转发。

参考文献［23］提出了一个名为EDD（Expected Disconnection Degree，预期断线

度）的路由指标，用于路径选择。EDD 反映特定时段的路径故障概率。当 RREQ 数据包充斥着传播区域时，中间节点使用 PHY 的车辆速度、链路质量、车辆轨迹和道路几何形状等信息计算并累加 EDD 指标。具有最小 EDD 的路径将会为即将到来的会话被目标节点选中。仿真结果表明，MURU 在支持时延的 QoS 指标上是鲁棒的。然而，MURU 的缺点是矩形区域可能导致找到非最优路径。

2. VANET 的 QoS 路由

参考文献［24］提出的 GVGrid（QoS routing for VANETs，VANET 的 QoS 路由）也是基于网络层和 PHY 之间的跨层设计。所有车辆均假定配备了 GPS 设备。网络地图被分成小的网格，位置信息用来转发数据包。如同 MURU 中一样，为 RREQ 传输定义了矩形区域。然而，RREQ 没有充满该区域，但每个节点从矩形区域内相邻的网格中选择一个候选网格，并传送 RREQ 给它，如图 4.6 所示。

图 4.6 表明当源节点 S 将要发现到达目的节点 D 的路径时，矩形网格就形成了。每个节点发送 RREQ 数据包到其相邻的网格中的被确定为最佳候选对象的节点。然后每个中间节点以与源节点相同的方式转发 RREQ 给其相邻网格中的节点。当 RREQ 到达目标节点时，基于参考文献［24］提出的公式选择具有最长预期生命周期的路径。然后目的节点开始利用该路径发送 RREP，沿路径返回到 S。我们的目标是找到具有最少十字路口、街道和交通信号的路由。因而通过利用 PHY 诸如车辆速度和方向以及路由特性（交通灯、停止标志等）的信息选择候选节点。

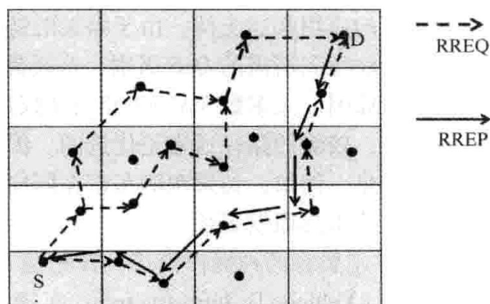


图 4.6　GVGrid 的路由发现过程

参考文献［24］的作者还提出了修复损坏路径的路径养护方法。基本思想是在最初的路由发现过程中不仅发现从信源到目标节点的一组转发节点，还发现最佳的被称为行驶路线的道路轨迹，任何车辆都可以沿途提供鲁棒和稳定的转发。因此，当一个转发节点发生故障时，路径养护方法试图在行驶路线上找到可替换的节点，从而减少重建行驶路线的延误。

3. 改进的贪婪的流量感知路由

参考文献［25］提出了被称为 GyTAR（improved Greedy Traffic - Aware Routing，改进的贪婪的流量感知路由）的网络层和 PHY 之间的跨层方法。GyTAR 的主要概念是发现鲁棒的且具有较高车辆密度的一组十字路口，并使用贪婪的携带—转发机制在十字路口之间转发数据包。每辆车都假定有 GPS 设备，使用周期性的 HELLO 数据包保持包含邻近车辆位置、速度和运动方向的邻居表。该协议被分成三个主要阶段：

1）确定道路的车辆密度。

2）选择将被用来转发数据包的十字路口。

3）使用贪婪的转发，在十字路口之间转发数据包。

在 GyTAR 的第一阶段，整个网格被划分成段，每个段包含十字路口之间的部分道路。这一阶段的目标是发现十字路口之间的车辆密度。每一道路段内的车辆被分为基于位置的单元，每个单元中指定一个节点为单元领头者，负责维护单元内的车辆密度信息。当车辆到达段的端部（即到达十字路口）时，发送 CDP（Cell Density Packet，单元密度包）到单元领头者（直接或通过中间节点），后者添加它们自己的单元密度信息更新该数据包。当 CDP 横穿道路段时，单元密度被累加，从而确定段的密度。

在 GyTAR 的第二阶段中，通过联合考虑交通密度和到目标节点的距离，动态地选择将用于转发数据包的一组十字路口。因此，当数据包从信源传送到目标节点时，选择最接近目标节点的下一个十字路口，它也因此具有最高的交通密度。在十字路口之间，GyTAR 的第三阶段发生，使用贪婪的携带—转发方法来路由数据包。一旦数据包确定到达下一个路口，每个节点使用邻居表来估算其相邻车辆的位置。具有最高速度朝下一个路口运动的节点将被选为下一跳。万一不能找到转发节点，该节点就携带数据包直到下一路口。由于转发是在每个路口在逐跳的基础上动态地完成，自动地包含了路由维护。参考文献［25］的仿真结果表明，GyTAR 可在吞吐量和时延方面获得良好性能。

4. 稳定的组路径路由

参考文献［26］提出了被称为 SGPR（Stable Group - Path Routing，稳定的组路径路由）的路由协议，利用来自 PHY 的关于车辆速度、位置和移动方向的广泛信息，在网络层选择稳定的路由路径。参考文献［26］的作者标记稳定的路由路径为那些链路预计将长期存在的路径。车辆分为四个移动组，其中同一组内的车辆具有相同范围的速度矢量（即具有相同的速度和方向范围）。每个组围绕四个主要方向（北、南、东或西）中的一个跨越笛卡尔空间 90°，如图 4.7 所示。通过选择所有车辆都属于相同移动组的那些路径，可以实行稳定的路由，并找到具有长生命周期的链路。

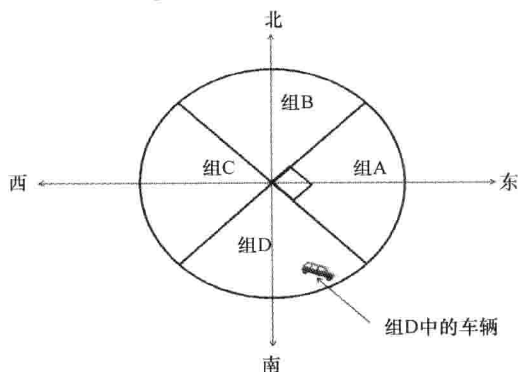


图 4.7　SGPR 中的移动组

当源节点希望发现一个到达目的节点的路径时，就传播一个 RREQ 包。虽然 SGPR 假设每部车辆都配备 GPS 系统和位置地图，但没有假设源节点知道目标节点的位置。因此，RREQ 充斥着整个网络。源节点在 RREQ 包中插入组的 ID。当接收到 RREQ 时，每个中间节点检查它是否属于同一个组，并且只有在它与源节点属于同一组 ID 时才转播该数据包。因此，当 RREQ 到达目标节点或者知道到达目标节点路径的节点时，路径上所有的中间节点将属于相同的移动组。

当 RREQ 到达目标节点或知道到达目标节点路径的节点时，RREP 包被发送回源节点。当每个中间节点收到 RREP 时，就使用有关车速和 GPS 位置的信息，计算名为 LET

（Link Expiration Time，链路过期时间）的指标。每个中间节点将检查 RREP 包中 LET 区域，并核对新计算的指标是否小于包中那个值。如果是，就会用新计算出的 LET 值替换该区域。这样，只有反映整个路径预期生命周期的 LET 瓶颈值返传到源节点。

SGPR 还在发生链路中断时采用路由恢复程序。当这种情况发生时，认识到中断的节点会检查它是否已经知道一个到达目标节点的替代路径。如果这样的路径是可用的，就会被直接利用，并将路线变化告知源节点。如果没有发现这样的路径，本地的恢复过程就开始了。如果认识到中断的节点更靠近源节点而不是目标节点，源节点就指示开始新的路由发现过程。另外，如果节点更靠近目标节点，就发送一个 RREC（Route Discovery Message，路径发现消息）给两跳的相邻节点以找到替代链路。同一个移动组中两跳邻域内的节点会回复 RREC，然后取代破损的链路。

5. 路由维护机制

由于高动态性，VANET 的路由协议必须履行路径维护功能，支持 QoS 应用时尤其如此。传统的路径维护协议大多是被动的，路由节点或链路失效后才会被替换。然而，被动的维护可以慢慢适应，从而降低 QoS 支持的质量。主动维护在 QoS 阈值违背之前替换节点或链路，可以阻止连续数据流的破坏。

参考文献［27］基于考虑节点速度以及缓存拥塞的可靠性指标，提出了一种基于触发器的主动维护算法。当确定一个链路不可靠时，链路上两个节点中的一个将传播一个路由维护包到它的单跳邻居。为了说明这一点，图 4.8 显示了一个多跳网络中节点 C 在路线 ABC 上发送数据包。当节点 B 确定为不可靠的并因此连接 BC 时，节点 C 传播一个特殊的 HELLO 消息给它的单跳邻居，即图中的节点 D 和 E。然后节点 D 确定它也是节点 A 的单跳邻居，因此回复节点 C 并在即将到来的传输中替换节点 B。参考文献［27］的仿真结果表明，该算法提高了吞吐量、投递率和端到端的潜伏期。

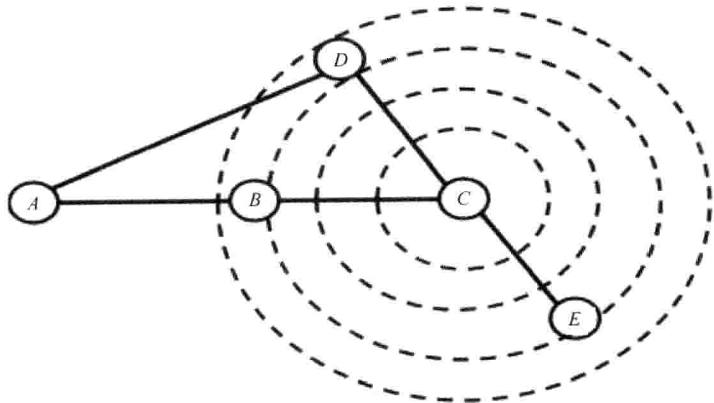


图 4.8　路由维护操作

在参考文献［28］中，当信号强度主要由于节点活动在相邻节点发送或接收范围外而下降到低于某一阈值时，维护操作被触发。然而，参考文献［28］中是移动节点发送为自己寻找替代者的路由维护包。参考文献［28］作者还提出了在无法找到合适

节点时更广泛的节点搜索方法。

这些维护算法可以用在任何多跳网络中，但在 VANET 中特别重要。尽管维护指标可能变化，大多数维护算法是基于参考文献［27］和［28］中所阐述的基本思想，发送控制消息进行本地维护。另一种确保稳定的方法是在发现过程中建立数条路径，当其中一个出现故障时简单地使用替代路径。参考文献［29］采用了这种方法。

同 WSN 一样，具有严格资源限制的网络的 QoS 支持采用了一个完全不同的角度。有限的能量和处理能力对协议设计和可支持的应用性质施加了限制。WSN 的 QoS 支持的思想在下一节进行研究。

4.3.4　WSN 中的 QoS 路由

WSN 的性质不同于其他类型的多跳网络。它们在监控和跟踪应用方面是理想的，通常长时间（有时超过一年）工作。因此，WSN 的能量是最稀缺的资源，路由必须进行精心设计，以避免浪费开销或不必要的传输。

此外，WSN 中发送的任何信息的目标通常是汇聚节点，通常不使用点对点的通信。例如，数据传输可以是时间驱动、查询驱动、事件驱动，或者是这些方法的组合。早期的 WSN 路由协议包括 LEACH（Low – Energy Adaptive Clustering Hierarchy，低能量自适应聚类分层）[30] 和 GeRaF（Geographic Random Forwarding，地理随机转发）[31]。这些协议主要关注选择高效节能的路径。在 LEACH 中，网络被划分成簇，每组传感器节点发送信息给指定的节点，称为簇头。然后簇头相互通信中继数据到汇聚节点。簇头的职责在同一簇内的节点之间交换以实现负载均衡。在 GeRaF 中，节点使用地理信息寻找到达基站的最短路径。有信息要发送的节点简单地将数据传播到所有活跃的邻居，最接近目标节点的邻居将选择转发数据。这个过程重复进行直到数据包到达汇聚节点。

1. 多径多速路由协议

虽然 LEACH 和 GeRaF 是高效节能的协议，但它们不能适应 QoS 的应用。为了解决 WSN 的 QoS 支持问题，参考文献［32］提出了 MMSPEED（Multipath Multispeed Protocol，多径多速路由协议），并考虑 MAC 的可靠性指标，以及 PHY 的时延指标和 GPS 或位置信息以帮助网络层的数据包转发。如果 QoS 参数要求时延，参考文献［32］的作者定义了一个阈值——SetSpeed，以确保网络上的最大时延得到保证。每个节点维持传送到每一个活跃邻居所需时延的估计值（包括排队、处理和碰撞时延），并使用该估计与位置信息一起计算各相邻节点的进展速度。进展速度定义为进度距离（当前节点到目标节点的距离与下一跳到目标节点的距离之间的差值）除以时延估计值。具有最大进展速度的邻居节点将被选择作为下一跳。只要每一跳的进展速度大于 SetSpeed，整个网络端到端的时延就受 SetSpeed 与信源和目标节点之间距离的约束。

参考文献［32］的作者还定义了 MAC 中每个节点确保不违反时延阈值的调度器。补充了几个优先级队列，每一个都有预定义的 SetSpeed。调度器挑选出接近于违反阈值的数据包。如果没有发现进展速度大于 SetSpeed 的转发节点，调度器从队列中丢掉一些数据包，以确保不超过最大时延。这意味着为了速度牺牲了可靠性。

另外，MMSPEED通过允许多路径传送数据包支持数据包递送的可靠性。中间节点基于误差指标决定应使用多少路径。这个误差指标反映了每个节点数据包丢失的概率。当所要求的可靠性增加时，就要使用更多的路径以确保低的丢包率。然而，利用多条路径会增加网络中的干扰，并增加发生碰撞的可能性。

2. 成本和碰撞最小化路由

参考文献［33］介绍了另一个网络层、MAC和PHY之间的跨层方案，提出了CC-MR（Cost and Collision Minimizing Routing，成本和碰撞最小化路由）。CCMR解决由于MAC层的竞争引起碰撞造成的能量浪费问题。CCMR的路由是逐跳点播方案，其中每个节点负责选择能优化某一指标的下一跳，提出了一个二维的成本指标。这两个维度对应于成功竞争的概率和任何其他重要的网络指标。几个指标的组合也可以实现。参考文献［33］中该指标选为相对于目标节点的地域推进（从PHY的GPS信息获得）。因此参考文献［33］CCMR的目标是选择使成功竞争概率和相对于目标节点的地域推进都最大化的下一跳。CCMR在选择路由指标上提供了一定程度的灵活性。

为了进行路由，将要传送信息的节点发送RREQ到其单跳距离内相邻的所有活跃节点。接收到RREQ的每个节点首先利用来自PHY的位置信息确定其是否提供了相对于目标节点的地域推进。然后协议定义了MAC可用于发送RREP的一组时隙（竞争窗口）。如果接收到RREQ的节点确定它可以提供相对于目标节点的地域推进，就会基于上述二维路由指标计算应使用哪个时隙来发送RREP。具有最小路由指标的节点将具有最小的竞争窗口，因而将在其他节点之前发送RREP，因此被选为下一跳。CCMR被证明是鲁棒的，并且可以在网络负载较高的情况下通过减少碰撞机会节省能量。

3. 异构WSN的高效节能多跳轮询

另一个解决冲突问题的协议是EEMP（Energy - Efficient Multihop Polling，高效节能多跳轮询）[34]，是网络层和MAC之间的跨层设计。EEMP假定网络结构的异构和分层，其中网络被分成簇，每个簇头控制一组传感器。假定簇头具有比普通传感器更高的能量和操作功率。此外，EEMP假设每个节点都从GPS或其他途径知道自己的位置。

在EEMP的初始阶段，簇已形成。簇头轮流在控制消息中播送它们的ID。注意到簇头的顺序是根据分配给它们的ID而预定的。每个簇头将在一个预定的时段内等待，直到前一个簇完成了它的本地传感发现程序。当听到传播信号，传感器节点将采用基于竞争的MAC协议发送回复到簇头。当所有第一跳的传感器节点发送完回复，簇头将要求这些传感器每一个依次发送广播数据包，以确定第二跳的邻居。因此，EEMP允许簇内存在多跳。之后的一段充足的时间内，这一过程将在每一个簇头重复多次，直到发现网络中的每个节点。需要注意的是，如果一个节点接收到几个簇的传播信号，它只会加入接收信号功率最高的那个簇。

一旦簇形成，节点可以开始发送数据包。这是通过使用网络层和MAC的多跳轮询算法来完成的。由于簇头不能提前知道哪个节点有数据包发送，它们将先轮询涵盖簇的所有中继路径节点的子集。每个节点i，反过来除了发送任何负责转发数据的第二跳节点的数据包数，还将发送一个数据包（如果有的话）。在这一阶段完成之后，簇头除了

得到所有剩余的要发送的数据包信息外，还将获取一些数据包。然后簇头计算出最大限度地减少发送所有数据包所需的循环数的调度。不与其他节点竞争的第二跳的节点可以在第一跳同时发送数据包。此调度是自由竞争的，所需传送的次数是最小的，从而导致高效节能。此外，如果时延需要达到截止时间，节点可以赋予优先级。

4. 时延保证路由和 MAC 协议

为了尽量减少碰撞并确保传输效率，参考文献［35］利用基于 TDMA 的 MAC，提出了 DGRAM（Delay Guaranteed Routing and MAC，时延保证路由和 MAC）。因此 DGRAM 是网络层和 MAC 之间的跨层方法。与许多其他基于 TDMA 的 MAC 协议相反，DGRAM 不要求集中式的节点，并且每个节点可以自己决定其发送时隙。为了执行此任务，DGRAM 做出如下假设：假定所有的节点都同步，WSN 的覆盖范围是汇聚节点在中心的圆，所有节点都知道自己与汇聚节点的相对位置，且所有节点在初始阶段发现网络中其他所有节点的位置。网络的拓扑结构被分成径向层和块，使用位置信息，每个节点将确定其相应的层和块，如图 4.9 所示。

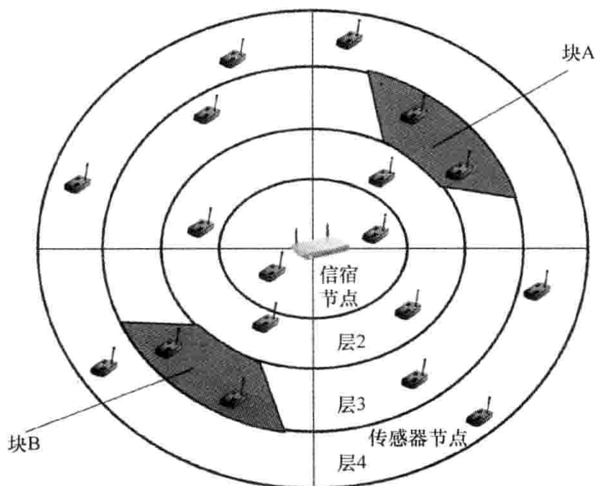


图 4.9　DGRAM 中的层和块

在每个节点发现它所属的层和块之后，下一步就是确定 TDMA 调度。为了做到这一点，时间被划分为超帧、子帧、子子帧和时隙。每个时间类别的大小取决于网络中节点的数目（对所有节点已知）。超帧是 TDMA 调度重复后的时段，包含多个子帧。每一层都分配了一个子帧，其中两个连续的层不能使用相同的子帧传输以避免碰撞。然而，两个分开的层的节点可以在同一子帧中传输。

根据块的数量每个子帧被分成子子帧。相邻块的节点不能使用相同的子子帧传输。与子帧中一样，由两个块分开的节点可以使用相同的子子帧传输。同一个子子帧内的每个节点根据其与汇聚节点的径向距离（对每个节点已知）分配自己的时隙。具有最小径向距离的节点得到首个时隙，依此类推。如果径向距离有限制，就使用角距离。因此，通过了解节点和汇聚节点的位置，每个节点可以确定自己的块和层，并因此确定它

在每个超帧中的时隙、子帧以及子子帧。通过知道每个节点可以发送的准确时间，整个网络的时延可以精确地得到限制。此外，由于最大限度地减少了碰撞，DGRAM 是高效节能的。

4.3.5 不同网络路由设计的局限性

无线网络的未来趋向互联互通和兼容性。无线用户从一个网络移动到另一个网络时需要无缝连接。因此，可以预料，不同网络之间将需要 QoS 支持。例如，WMN 能够提供覆盖一个大的区域的连通性的伞，如大学校园，而较小的 MANET 覆盖个别建筑物。研究实验室可能要求他们的 MANET 或 WMN 可以连接到偏远地区的 WSN，而在建筑物之间或校园周边高速移动的 VANET 可以为用户提供独家报道。

这样的异构网络的连通性和 QoS 支持是非常具有挑战性的。每种网络类型都有自己的设计挑战，这使得很难设计一个所有网络统一的 QoS 支持的框架。但是，指出网络之间的一些相似之处是有用的，可能使我们接近互联互通的最终目标。

例如，MANET 和 WMN 具有一些相似之处。两个网络都遭受到干扰的挑战，并且可以支持挑战性的应用。然而，MANET 由于不存在集中式节点，要求所有协议是完全分布式的。因此，严格地说，任何分布式协议可以用于两个网络。CACP、AAC、IQRouting、iCAC 以及 ACA 是这种协议的例子。互操作性的另一种解决办法是在 WMN 中实行集中管理系统，负责从信源到目标节点设置端到端的路由，不管它们属于哪个网络。这种解决方案的缺点是在两个网络之间可能需要一个网关提供兼容性。参考文献［36］提出了实现这种兼容性的框架。这项提议通过考虑吞吐量、时延和 PLR 指标，基于决定要最佳的服务网络以提供 QoS 支持的 GVLL（Generic Virtual Link Layer，通用虚拟链路层）。然而，这一解决方案要求至少某些节点有一个用于 WMN、一个用于 MANET 的双接口，借此 GVLL 将传入的数据包交给 MAC 层的提供最佳 QoS 支持的合适的接口。

虽然 GVLL 提供的是跨越 WMN 和 MANET 的连接，其思想也可以适用于 WMN 和 WSN 之间的连接。然而，该问题由于 WSN 严格的节能要求具有多重挑战。一般来说，MANET、WMN 和 VANET 的路由协议牺牲能量以提供 QoS 支持。因此，简单的协议变换是不够的。协议设计必须包含仔细的能量考虑。这不仅指剩余的电池电量，而且还指负载均衡（在多节点上划分负载），以避免节点子集的过度使用和网络的过早失效。如果 WMN 或 MANET 与 WSN 之间建立起连接，对部分属于 WMN 和 MANET 以及部分属于 WSN 的路由必须包括不同的考虑。据我们所知，这样的任务还没有在研究中尝试过。

VANET 与其他网络之间的连接也具有挑战性。VANET 要求的高移动性和动态拓扑，导致其 QoS 路由设计不同于其他网络。这本质上意味着提供了 VANET 与任何其他网络互联互通的协议必须具有高度适应性并反应迅速。带内信令是一种能够这样快速反应的技术。使用这种技术，数据包捎带上控制信息以减少辅助操作并提供持续监控网络状态的方法。INSIGNIA 框架[37]是一个经典的使用带内信令的 QoS 支持的提议，为提高性能已在许多方面进行了改进和调整[38]。虽然该提议严格用于 MANET，但其思想可以

在持续监控 VANET 中采用，以适应网络的动态拓扑。

在几个网络之间实现连通性只是问题的一部分。不同网络之间端到端的 QoS 支持是非常具有挑战性的。首先，通常每个网络需要多于其他网络的某些 QoS 参数。例如，时延是 VANET 最需要的参数，PLR 通常是 WSN 的焦点，而 MANET 和 WMN 可能需要几个参数。出于这个原因，每一个网络类型的研究通常关注最需要的参数。但是，如果要同时考虑 QoS 支持和无缝的互联互通，就必须研究任何网络任何参数的支持。QRDS、RRS、MMSPEED 和 CCMR 都考虑不止一个指标，但只限于单一网络的范围。为了接近一个任何网络 QoS 支持的统一的框架，研究必须以一种通用的方式开始考虑几个网络的需求，并且当数据包从一个网络移动到另一个时，提供调整协议的方法。随着不同网络更多需求的出现，这样的研究最终将增多。目前已经有 MANET 和 WMN 之间连通性的显著需求，而这种需求在未来只会增加。

4.4 QoS 路由协议比较

本节介绍本章中考查的路由协议之间的比较。对协议采用的跨层方法和其解决的 QoS 支持进行比较，如它们所支持的 QoS 指标和所考虑的网络约束。本节的目的是为读者提供每个协议设计方面优缺点的洞察，从而为不同类型多跳网络的 QoS 路由协议的未来设计者奠定基础。表 4.2 总结了所考查协议方面的一些内容。

表 4.2　QoS 路由协议的比较

名称	QoS 指标	磁盘传播模型	网络目标/需求	集中式/分布式	移动性支持	路径维护	跨层研究		
							涉及的层	PHY 参数	MAC 参数
CACP[13]	吞吐量	有	MANET/最佳的 QoS 支持	分布式	有限支持	无	网络层 + MAC + PHY	可用带宽 + 功率自适应 (CACP – 功率)	呼叫准入 + 争用计数
RAC[14]	吞吐量	有	MANET/最佳的 QoS 支持	分布式	有限支持	无	网络层 + MAC + PHY	可用带宽 + 速率自适应	呼叫准入 + 争用计数
AAC[15]	吞吐量	有	MANET/最佳的 QoS 支持	分布式	支持	无	网络层 + MAC + PHY	可用带宽	呼叫准入 + 拥塞等级
IQRouting[16]	吞吐量	有	MANET/最佳的 QoS 支持	分布式	不支持	无	网络层 + MAC + PHY	可用带宽 + 集团约束	呼叫准入
iCAC[17]	吞吐量 + 公平性	有	MANET/最佳的 QoS 支持	分布式	不支持	无	网络层 + MAC + PHY	可用带宽	储备余量 + 优先级调度
QRDS[18]	吞吐量 + 时延 + PLR	无	WMN/最佳的 QoS 支持	集中式	不支持	无	网络层 + MAC + PHY	干扰 + 时延 + PLR	呼叫准入 + 调度

（续）

名称	QoS指标	磁盘传播模型	网络目标/需求	集中式/分布式	移动性支持	路径维护	跨层研究		
							涉及的层	PHY 参数	MAC 参数
RRS[19]	吞吐量+时延	无	WMN/最佳的 QoS 支持	集中式	不支持	无	网络层+MAC+PHY	干扰+话务信息	拥塞等级
ACA[20]	吞吐量	有	WMN/最佳的 QoS 支持	分布式	不支持	无	网络层+MAC	N/A	呼叫准入+繁忙度+调度
MURU[23]	链路生命周期+时延	有	VANET/高的节点流动性	分布式	支持	有	网络层+PHY	GPS 信息+时延	N/A
GVGrid[24]	链路生命周期	有	VANET/高的节点流动性	分布式	支持	有	网络层+PHY	GPS 信息	N/A
GyTAR[25]	链路生命周期+吞吐量	有	VANET/高的节点流动性	分布式	支持	有	网络层+PHY	GPS 信息	N/A
SGPR[26]	链路生命周期	有	VANET/高的节点流动性	分布式	支持	有	网络层+PHY	GPS 信息	N/A
MMSPEED[32]	投递率+时延	有	WSN/能量敏感度	分布式	有限支持	无	网络层+MAC+PHY	本地信息+时延	调度+链路可靠性
CCMR[33]	成功争用+任何成本	有	WSN/能量敏感度	分布式	不明确	无	网络层+MAC+PHY	本地信息	争用窗口大小
EEMP[34]	能量效率+成功争用	无	WSN/能量敏感度	半集中式（簇）	有限支持	无	网络层+MAC	N/A	投票+调度
DGRAM[35]	能量效率+成功争用	无	WSN/能量敏感度	分布式	有限支持	无	网络层+MAC	N/A	调度

如表 4.2 所示，所有考查的协议都使用跨层设计。CACP、RAC、AAC、IQRouting、iCAC、MMSPEED、CCMR、QRDS 和 RRS 利用网络层、MAC 和 PHY 之间广泛的跨层交互。例如，CCMR 基于 MAC 计算的竞争概率和 PHY 的 GPS 信息，计算出路由指标。然后路由协议指示 MAC 应使用的竞争窗口的大小。在 QRDS 和 RRS 中，大量的 PHY 信息传递到网络层，随后产生 MAC 中使用的传输调度。另外，其他协议的路由决策只使用 PHY 或 MAC 的信息。此外，不同协议跨层交互的程度不同。例如，指定的 VANET 协议仅利用网络层和 PHY 之间的信息交换，而诸如 EEMP 的协议则广泛地结合了 MAC 和

网络层的信息以便执行多跳轮询。同样的，所有指定的 MANET 协议结合网络层和 MAC，并同时利用与 PHY 的信息交换进行路由和呼叫准入。

值得关注的是，大多数上述协议的路由设计包括 PHY 指标。这使我们相信，PHY 参数一般可以对路由和网络性能产生深远影响。PHY 参数对 QoS 支持特别重要，因为一些应用需要 PHY 资源的保证，如带宽或端对端的时延。因此，路由协议的设计和评估阶段利用逼真的 PHY 和传播模型特别重要。不幸的是，上述大部分协议（QRDS、RRS、DGRAM 和 EEMP 除外）使用磁盘传播模型评估，其中假设各个方向上的传输均匀地到达一个固定的距离。这种模式是不现实的，可能导致不准确的结果。

上述所有协议都把 QoS 支持作为主要目标。CACP、IQRouting、AAC、iCAC、QRDS、RRS 和 ACA 都针对吞吐量的 QoS 指标。这是因为 MANET 和 WMN 的流量需求高，带宽是一种稀缺资源。因此，提出的 MANET 和 WMN 的大多数协议旨在更好地利用共享媒介。由于 WMN 中存在集中式的节点，QRDS 和 RRS 协议设计旨在利用这一特点。集中式节点可以通过从网络收集的信息优化参数，以高复杂度为代价实现更好的性能。考查的所有其他的协议采用分布式操作，这是由于 MANET、WSN 和 VANET 网络性质的要求。EEMP 假设存在能够执行集中操作的复杂簇头。

使用链路冲突图，如在 IQRouting 算法中，对于确定每个链路中存在的干扰量可能是准确的，但在开销方面代价很高，特别是当网络大或高度动态时。QRDS 的一个显著优点是它同时考虑几个指标，即吞吐量、时延和 PLR。然而，QRDS 的缺点是，它没有针对其他 QoS 协议进行有效的分析。RRS 为该协议提供了考虑时延以及吞吐量的修正。ACA 只考虑了吞吐量指标，但也服务于实时和非实时流量之间的差异。ACA 中实时流量优先以保证满意的 QoS 等级。

另外，MURU 考虑了 QoS 指标中的时延，这是诸如碰撞警告的 VANET 应用的一个重要指标。此外，MURU、GVGrid、GyTAR 和 SGPR 在路由决策中考虑链路生命周期，这是由 VANET 的性质决定的。然而，只有 MURU 和 GyTAR 提及 VANET 中如何保证任一经典的 QoS 指标（如吞吐量或时延）。由于网络限制，所有 VANET 协议使用路径维护算法来修复因频繁的链路故障而损坏的路径。

WSN 的网络性质强加了不同的约束，主要是能量灵敏度和有限的节点能力。为了解决这些问题，提供的协议复杂度低，避免大量操作，如优化。MMSPEED 的优点是考虑了两个 QoS 指标：时延和数据包传递的可靠性。MMSPEED 和 CCMR 的缺点是没有研究协议的能量效率。CCMR 在路由指标中提供了涵盖节点剩余能量的方法，但在评估协议性能时没有研究这个问题。然而，这两种协议提供了 WSN 中 QoS 支持的有趣思想。EEMP 和 DGRAM 把能量效率作为主要目标。他们提出了最大限度地减少节点竞争的协议，从而保证了高效的传输。此外，在 EEMP 中使用轮询以及在 DGRAM 中使用 TDMA 调度，提供了 WSN 中控制数据包传递时延的方法。

4.5　面临的挑战与未来的发展方向

尽管协议的演进针对 QoS 支持，用户应用也通常以更快的步伐不断演变。因此，需

要不断地研究以适应这种挑战性的应用，并改善越来越多无线用户的 QoS 支持。为了达到这个目标，需要解决一些挑战并探索新的方向。

需要进一步研究的一些重要问题包括不同类别流量的支持和多跳网络间互联网服务的支持。虽然存在单独支持几乎所有 QoS 参数的研究，但是当节点要求不同参数支持时，处理它们之间相互作用的研究有限。这是一个需要进一步研究的问题，尤其是对于 MANET 和 WMN，因为很可能其中不同的节点同时要求不同的应用。一些模型已在互联网中实现了，尤其是 DiffServ（Differentiated Services，区分服务）模型，已经适应了多跳网络中 QoS 支持的应用。DiffServ 是一个为用户支持不同层次服务的简单模型，不需要保留并无须集中控制。它主要是基于允许中间路由器确定不同流上数据包的优先次序的方法。参考文献［39］通过建立一个负责运送高优先级数据包的主干提出了多跳网络中适应 DiffServ 的建议。

由于对网络性能产生的深远影响，PHY 特别重要。诸如带宽和时延的资源评估直接影响 QoS 支持的效率。如果协议在评估资源上过于保守，那么这些资源可能利用不足。另外，资源的低估可能导致显著的丢包和 QoS 水平下降。已经提出了几种估计带宽的方法。测量信道繁忙时间和 SINR 是最流行的测量带宽的方法。由于带宽估计很重要，需要进行不断的研究以提高其准确性。致力于评估和支持端对端时延的研究量比带宽研究少得多，因此需要加以改进。资源评估的主要挑战是资源可能在各自传输范围之外的相互干扰的节点之间共享，同时没有能够监控网络资源的集中节点。需要更多的研究以开发分布式资源评估的准确方法。

另一个重要的可以显著提高 QoS 支持的 PHY 问题，是整个网络跨层框架的功率和数据速率的参数优化，而不仅仅是单个链路。功率控制可以节约能量，优化网络连接，并控制网络中的干扰程度。数据速率控制可以使链路可用（如果之前不可用），因为较低速率的传输比更高速率的传输需要更低的功率阈值，因而可以容忍更差的信道条件。

在路由设计中，开发多天线也是一个突出的研究方向。MIMO 技术是潜力巨大 PHY 技术，因为它可以显著改善链路容量和质量。参考文献［40］探索了路由和 MIMO 之间的跨层设计，通过控制用于传输的天线数量限制干扰并提高信号质量。参考文献［41］充分利用了 MAC 的 MIMO 和自适应调制的结合优化无线资源利用或拓展信号范围。因为 MIMO 提高了 SNR，SNR 增益可以用于更大范围或更高数据速率的传输。网络层有许多 MIMO 可以利用的方法，这一思想确实应受到更多的关注。

还有一些通常被认为是次要（相对于直接的 QoS 指标支持）但可能对 QoS 支持有显著影响的挑战。诸如拥塞和公平的挑战往往分开考虑，不属于 QoS 支持的范围。拥塞可能意味着在低优先级流量竞争时丢弃了高优先级的流量。不考虑节点间的公平性可能意味着为确保高的总吞吐量，一些用户可能会被拒绝服务。TDMA 调度在确保公平性和处理可能会造成拥堵的高流量负荷上可能是有效的，但由于分布式网络的动态特性，有时很难实现。

研究者目前正在探索的一个很有前途的方向，是在同一网络中引入具有不同能力的节点。由于不同的无线标准具有不同领域的优点，可以相互补充，从而能获得更好的网

络性能或更广泛的应用，因此这一研究方向具有很大的潜力。这一思想已在卫生保健领域有大量医护人员应接不暇的受难者的应急响应和灾难场景中进行了探索。哈佛大学的 AID - N 组织[42]和 CodeBlue[43]研究团队共同提出了一个可以自主监测患者在紧急情况下生命体征的网络平台。这个网络由无线传感器、特设节点和互联网服务入口组成。这样的网络路由很复杂，需要更多的关注。必须考虑不同类型节点的能力和限制以实现网络的全部潜力。WSN 中也可以使用异构节点缓解拥塞，或者通过使用更强大的节点以传送到更远的距离，或在中间节点处理数据以节省能量。

由于能量和处理资源有限，WSN 中的 QoS 支持特别具有挑战性。因此硬件限制将最终阻碍 WSN 中的 QoS 路由研究。能量收集与可再生能源（如太阳能电池）[44]对于解决有限的能量资源非常重要。随着高效节能硬件研究的改进，QoS 支持也可能得到改善。然而，在硬件改善之前，提高网络性能最有前途的方向之一是在多跳网络中采用认知方法[45]。跨层次的方法正面临着一些障碍，如自适应循环、缺乏不断变化的网络条件的适应能力、反应迟钝以及缺乏支持多个相互冲突目标的能力。

正如本书所强调的，由于认知方法能够在网络的不同层中实现智能化以提高适应能力，并实现网络端对端的目标，因此可以在这一领域获得突破。在 PHY，认知无线电能够缓解干扰问题，并通过伺机和动态地使用无线电频谱提供无线资源可用性的提升。这对于流量大的 MANET 和 WMN 也特别重要。在较高的层次，认知引擎可以为节点提供根据应用需求和动态的无线环境学习和调整参数的方法。这必将在诸如 WSN 和 VANET 等挑战性的网络中为 QoS 支持打开新的大门，并在存在多个相互冲突的目标时帮助实现网络目标。

4.6　结论

本章介绍了多跳无线网络 QoS 路由设计的广泛研究。探讨了四种类型的多跳网络，即 MANET、WMN、VANET 和 WSN，并由于其高效性重点关注了跨层协议。强调了每种类型多跳网络路由设计的主要挑战及问题，并研究了应对这些挑战及问题的协议。

多跳网络中有几个问题还没有得到完全解决。这些问题包括服务差异化、精确的资源评估、实际可行的 PHY 和传播模型以及功率和数据速率控制。认知通信也代表了一个新的方向，有望为几个持久的网络问题提供解决方案，如拥挤的频谱和相互冲突的网络目标。QoS 支持肯定是有显著意义的话题，未来可能会继续得到研究界的极大关注。

参考文献

1. S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, *Mobile Ad Hoc Networking*, John Wiley and Sons, 2004.
2. R. Shorey, A. Ananda, M.C. Chan, and W.T. Ooi, *Mobile, Wireless and Sensor Networks, Technology, Applications and Future Directions*, John Wiley and Sons, 2006.

3. I. Stojmenovic, *Handbook of Sensor Networks, Algorithms and Architectures,* John Wiley and Sons, 2005.
4. Q. Zhang and Y.-Q. Zhang, "Cross-layer design for QoS support in multihop wireless networks," *Proceedings of the IEEE* 96, no. 1, January 2008, pp. 64–76.
5. L. Chen and W. Heinzelman, "A survey of routing protocols that support QoS in mobile ad hoc networks," *IEEE Network Journal* 21, no. 6, November 2007, pp. 30–38.
6. L. Hanzo II and R. Tafazolli, "Admission control schemes for 802.11-based multi-hop mobile ad hoc networks: A survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11, no. 4, December 2009, pp. 78–108.
7. F. Li and Y. Wang, "Routing in vehicular ad hoc networks: A survey," *IEEE Vehicular Technology Magazine* 2, no. 2, June 2007, pp. 12–22.
8. C. Perkins and E. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (WMCSA), February 1999, pp. 90–100.
9. C. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance vector (DSDV) routing for mobile computers," *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols, and Applications (SIGCOMM)* 24, no. 4, October 1994, pp. 234–244.
10. D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom),* September 2003, pp. 134–146.
11. L. Ma and M. Denko, "A routing metric for load balancing in wireless mesh networks," *21st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINAW)* 2, May 2007, pp. 409–414.
12. A.J. McAuley, K. Manousakis, and L. Kant, "Flexible QoS route selection with diverse objectives and constraints," *16th IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS),* June 2008, pp. 279–288.
13. Y. Yang and R. Kravets, "Contention-aware admission control for ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 4, no. 4, July 2005, pp. 363–377.
14. L. Luo, M. Gruteser, H. Liu, D. Raychaudhuri, K. Huang, and S. Chen, "A QoS routing and admission control scheme for 802.11 ad hoc networks," *International Conference on Mobile Computing and Networking,* September 2006, pp. 19–28.
15. R. de Renesse, R. Friderikos, and H. Aghvami, "Cross-layer cooperation for accurate admission control decisions in mobile ad hoc networks," *IET Communications* 1, no. 4, August 2007, pp. 577–586.
16. R. Gupta, Z. Jia, T. Tung, and J. Warland, "Interference-aware QoS routing (IQRouting) for ad hoc networks," *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM),* November 2005, pp. 2599–2604.
17. K. Sridhar and M. Chan, "Interference based call admission control for wireless ad hoc networks," *IEEE International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems,* July 2006, pp. 1–10.
18. C.-H. Liu, A. Gkelias, and K.-K. Leung, "A cross-layer framework of QoS routing and distributed scheduling for mesh networks," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC),* May 2008, pp. 2193–2197.
19. W. Wang, X. Liu, and D. Krishnaswamy, "Robust routing and scheduling in wireless mesh networks under dynamic traffic conditions," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 8, no. 12, December 2009, pp. 1705–1717.

20. Q. Shen, X. Fang, P. Li, and Y. Fang, "Admission control based on available bandwidth estimation for wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 58, no. 5, June 2009, pp. 2519–2528.
21. P. Pathak and R. Dutta, "A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2010, pp. 1–33.
22. M. Boban, G. Misek, and O. Tonguz, "What is the best achievable QoS for unicast routing in VANETs?" *IEEE Global Telecommunications (GLOBECOM) Workshops*, November 2008, pp. 1–10.
23. Z. Mo, H. Zhu, K. Makki, and N. Pissinou, "MURU: A multi-hop routing protocol for urban vehicular ad hoc networks," *3rd IEEE Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, July 2006, pp. 1–8.
24. W. Sun, H. Yamaguchi, K. Yukimasa, and S. Kusumuto, "GVGrid: A QoS routing protocol for vehicular ad hoc networks," *14th IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, June 2006, pp. 130–139.
25. M. Jerbi, S. Senouci, T. Rasheed, and Y. Ghamri-Doudane, "Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 58, no. 9, November 2009, pp. 5048–5059.
26. T. Taleb, E. Sakhaee, A. Jamalipour, K. Hashimoto, N. Kato, and Y. Nemoto, "A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56, no. 6, November 2007, pp. 3337–3347.
27. D. Shi, X. Zhang, X. Gao, W. Zhu, and F. Zou, "A link reliability-aware route maintenance mechanism for mobile ad hoc networks," *IEEE International Conference on Networking (ICN)*, April 2007, pp. 8–14.
28. C.-Y. Chang and S.-C. Tu, "Active route-maintenance protocol for signal-based communication path in ad hoc networks," *Journal of Network and Computer Applications* 25, no. 3, 2002, pp. 161–177.
29. Y.-H. Wang, C.-C. Chuang, C.-P. Hsu, and C. Chung, "Ad hoc on-demand routing protocol setup with backup routes," *IEEE International Conference on Information Technology: Research and Education*, August 2003, pp. 137–141.
30. W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* 8, January 2000, pp. 1–10.
31. M. Zorzi and R. Rao, "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 2, no. 4, October 2003, pp. 337–348.
32. E. Felemban, C.-G. Lee, and E. Ekici, "MMSPEED: Multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5, no. 6, June 2006, pp. 738–754.
33. M. Rossi, N. Bui, and M. Zorzi, "Cost and collision minimizing forwarding schemes for wireless sensor networks: Design, analysis, and experimental validation," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 8, no. 3, March 2009, pp. 322–337.
34. Z. Zhang, M. Ma, and Y. Yang, "Energy efficient multihop polling in clusters of two-layered heterogeneous sensor networks," *IEEE Transactions on Computers* 57, no. 2, February 2008, pp. 231–245.
35. C. Shanti and A. Sahoo, "DGRAM: A delay guaranteed routing and MAC protocol for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 9, no. 10, October 2010, pp. 1407–1423.

36. J. Roy, V. Vaidehi, and S. Srikanth, "Always best-connected QoS integration model for the WLAN, WiMAX heterogeneous network," *IEEE International Conference on Industrial and Information Systems*, August 2006, pp. 361–366.
37. S.-B. Lee and A. Campbell, "INSIGNIA: In-band signaling support for QoS in mobile ad hoc networks," *International Workshop on Mobile Multimedia Communication (MoMuc)*, October 1998, pp. 1–12.
38. Y. He and H. Abdel-Wahab, "HQMM: A hybrid QoS model for mobile ad hoc networks," *IEEE Symposium on Computers and Communications*, June 2006, pp. 194–200.
39. M. Fazio, M. Paone, D. Bruneo, and A. Puliafito, "Cross-layer architecture for differentiated service in ad hoc networks," *IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*, July 2008, pp. 128–135.
40. A. Gkelias, F. Boccardi, C. Liu, and K. Leung, "MIMO routing with QoS provisioning," *IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISPWC)*, May 2008, pp. 46–50.
41. E. Gelal, G. Jakllari, and S. Krishnamurthy, "Exploiting diversity gain in MIMO equipped ad hoc networks," *40th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, October 2006, pp. 117–121.
42. T. Gao, T. Massey, L. Selavo, D. Crawford, B.-R. Chen, K. Lorincz, V. Shnayder, L. Haunstein, F. Dabiri, J. Jeng, A. Chanmugam, D. White, M. Sarrafzadeh, and M. Welsh, "The advanced health and disaster aid network: A light weight wireless medical system for triage," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* 1, no. 3, September 2007, pp. 203–216.
43. T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. Ko, J. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B.-R. Chen, K. Lorincz, and M. Welsh, "Wireless medical sensor networks in emergency response: Implementation and pilot results," *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*, May 2008, pp. 187–192.
44. V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava. "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, April 2005, pp. 457–462.
45. G. Vijay, E. Bdira, and M. Ibnkahla, "Cognition in wireless sensor networks: A perspective," *IEEE Sensors Journal* 11, no. 3, 2011, pp. 582–592.

第5章　认知分集路由

5.1　无线传感器路由协议综述

5.1.1　无线传感器网络协议

传感器节点性能取决于处理、存储和能量三个要素，在这三个要素中，能量是最关键的。在传感器网络中，路由协议最重要的特点是能量效率和能量感知。由于传输距离的限制，多跳被广泛应用于无线传感器网络（WSN），它在信号衰减的情况下仍能保持有效的能量。无线传感器网络主要采用三种路由协议：基于扁平的路由协议、分级路由协议和基于位置的路由协议（Al - Karaki 和 Kamal，2004 年）。在基于扁平的路由协议中，网络中各节点具有相同的功能；在分级路由中，各节点功能不同，其目的是形成群集节点从而使能量聚合在簇头，以达到降低能耗的目的；而基于位置的路由协议则是利用节点位置信息达到寻找路由的目的。

基于信息协商的传感器协议（SPIN）是一种基于信息协商和资源自适应的扁平路由协议（Al - Karaki 和 Kamal，2004 年）。在该协议中引入信息协商和资源自适应机制的目的是解决泛洪路由的缺陷。在 SPIN 协议中，节点间在发送数据之前都要进行相互协商，以确保只有有用的信息才在网络中进行传输，这样就节省了大量能耗。为便于协商，节点通过元数据和高层描绘符来表示所要发送的信息，元数据描述了传感器收集的实际数据，由于收集的实际数据多种多样，因此元数据没有一个标准的格式，同时，元数据的大小比数据包要小的多，否则就不能满足 SPIN 协议目的。SPIN 协议首先发送一条与新数据有关的广播消息，然后那些想获取该数据的邻居发送一条请求数据消息，节点使用实际数据对该请求数据消息进行回复。通过这种方式，实际数据仅仅发送给那些需要该数据的节点，从而大大降低了发送信息的数量，这也就意味着节省了大量的能量（见图 5.1）。SPIN 的主要不足就是这种协商机制可能会导致远端节点接收不到它所需但中间节点并不需要的信息。对于那些需要定期发送数据包的应用而言，SPIN 并不是一种理想协议。

定向扩散协议是一种以数据为中心的协议，在该协议中，汇聚节点向一个指定的区域范围内发送问询消息，该区域的节点通过相互协作将数据汇集在一起，并将其发回汇聚节点（Verdone 等，2008 年）。该协议主要通过利用对传感器所收集到信息的一套命名机制来消除一些在网络层中不必要的行动，从而达到节约能量的目的。该协议的工作模式为：汇聚节点首先将以一种兴趣命名报文的方式通过泛洪向网络扩散，收到该报文并与之匹配的节点做出回应，并通过多个路径将所经过中间节点缓存和汇聚的数据发送

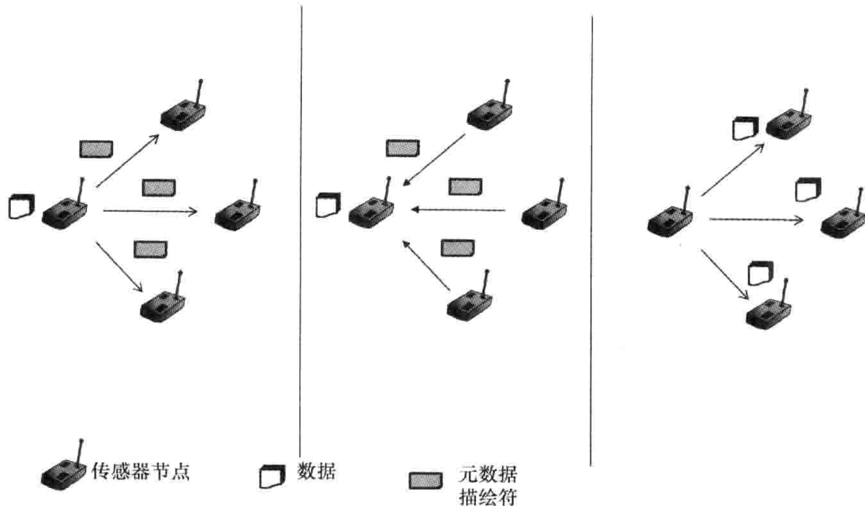


图 5.1　SPIN 协议协商过程

到汇聚节点，这些数据将定期刷新和更新。定向扩散协议的缺点是：该协议不适合于连续发送数据给汇聚节点的工作模式，因为该协议是基于查询的协议。命名机制是一种特殊的应用，在每次使用时都需要定制。此外，数据的匹配过程和数据的查询需要额外的开销。

PEGASIS 是一个分层的 WSN 路由协议（Al - Karaki 和 Kamal，2004 年），在 PEGASIS 中，形成的是传感器节点链而不是传感器节点簇或传感器节点簇头（见图 5.2），链中的每个节点发送信息给链中最近的节点，整个节点链中只有一个被指定的节点才能发送信息给汇聚节点。节点通过测算信号强度以确定其最近的节点，在确定其最近节点后，其会调整发送信号的强度以确保它只达到最近的节点。每个节点从其邻近的节点接收信息，并与自身的信息聚合在一起，转发到节点链的下一个节点。当节点链中有节点失效时，节点链将重构。在一些随机部署中，邻近的节点并非在节点链中，这导致节点将使用更多的能量进行发送。这个协议被认为是 LEACH 的改进协议，LEACH 协议的工作模式是：它形成一个簇，由簇头收集整个簇成员的信息后发送给汇聚节点。LEACH 协议的主要缺点在于给链内较远的节点发送信息时有过多的时延。此外，由于指定的头节点只有一个，加大了阻塞的概率。同样，该协议需要动态调整其拓扑结构，因为节点链中的节点只关注其邻居节点。

地理位置随机转发路由协议（GeRaF）是一种基于位置的 WSN 协议，该协议通过不同地理位置上的节点转发数据，接收信息的节点从这些转发节点中随机挑选以接收信息（Verdone 等，2008 年）。每个节点都清楚自身和汇聚节点的位置（如它们都配备了 GPS 接收机）。当一个节点要发送数据给汇聚节点时，它发送一个标注有其自身地址的汇聚节点地址的广播数据包，相邻节点根据数据包到目标节点距离的大小确定其下一跳的优先级（见图 5.3）。此后的中继转发也依据此方式进行，直到数据发送到目标节点。

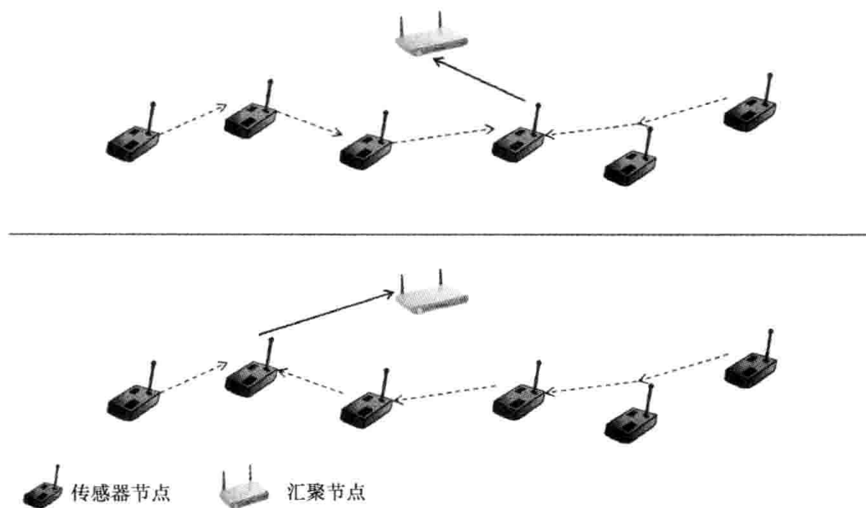


图 5.2　PEGASIS 节点链

邻近节点确定其是否作为中继节点是根据它与汇聚节点之间的距离，根据是否适合作为中继节点可以将信号覆盖区域区分为两个区域：中继区域和非中继区域，中继区域由哪些距目标节点比距发送节点更近的节点所在的区域组成，而非中继区域则相反。一个节点只有处于中继区域时才可作为中继节点。根据距目标节点远近的不同，中继区域还被继续分为不同优先级的区域。该协议主要缺点是除了对距离因素考虑以外，对其他因素考虑很少，这样会导致瓶颈状况的出现。该协议还有一个明显的缺点，就是缺少一套可靠的传输机制来保证传输的可靠性。

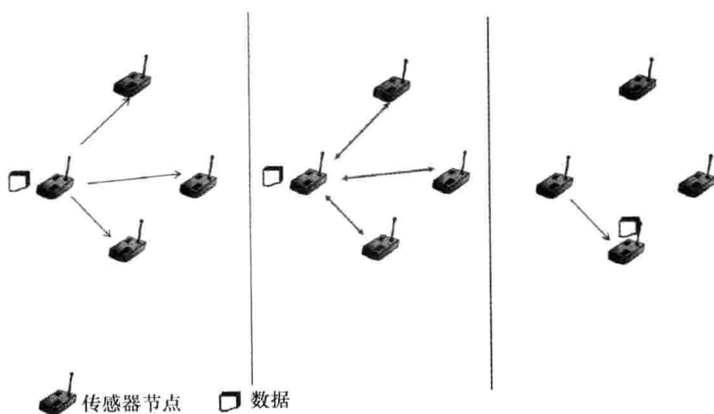


图 5.3　地理随机转发

GAF 是一种基于位置的能量感知路由协议，可用于移动 Ad Hoc 网络以及无线传感器网络（Verdone 等，2008 年）。GAF 将网络划分为相同面积的方形区域，形成虚拟栅

格。每个节点根据其自身位置与虚拟栅格中的一个区域相关联（如其位置由GPS接收机确定），其工作模式是保持区域中所需最少的节点在工作状态而其他的节点都处于休眠状态。区域内的节点相互配合并决定休眠状态的长度和周期。处于工作状态的节点，或区域主导节点，收集该区域所有节点的数据，将其整合并通过其他的工作节点以路由的方式发送给汇聚节点。被指定的节点与分层路由协议中的簇头非常相似，由此，GAF可以认为是一种基于位置的协议和分层协议的混合。节点交替处于主导状态，是为了平衡整体能耗。该协议的主要缺陷在于，由于只有网络主导节点在传输数据，可能会导致传输瓶颈、拥塞和更长的传输距离。

5.1.2 能量感知协议

能量感知协议通过选择最优的转发节点降低能耗。

例如，Frey、Ruhrup和Stojmenovic于2009年提出了能量感知路由协议。该协议认为，传播的能耗与信号衰减、启动损耗、转发和冲突的次数等有关，一次传播能耗的大小取决于发送器和接收机之间的距离。该协议假定一条传播路径的损耗等同于最小损耗，为了使发射包的功率最小同时也使从发射节点到目标节点转发包的功率最优，中继节点会选择距离目标节点最近的相邻节点。因此，最优数中间转发节点能够产生最小能耗，且最优数是基于两个节点的间距和通用功率测量参数确定的。能量路由试图使能耗最小化，但一个节点可能会被好几条路径选择，这可能会导致其利用率过高，从而使得其失效。该协议使用的成本指标与剩余电量成反比，转发节点试图实现成本总量和剩余路径的成本估计量最小化。

Kuruvila、Nayak和Stojmenovic于2006年提出的定位功率与成本已知路由方案是基于比例进步的思想。该协议中，邻居节点使包含信号衰减指数、最小接收功率和转发消息的功率三个要素的公式最小化，从而最大限度地减少了每个单元进程的功率。节点将数据包转发给距离目标节点近的邻居节点，从而使得消耗的能量与到达邻居节点能量（通过一个算法获得）的比值达到最小。这一过程可以通过减法或沿着指向目标节点的线路进行投影来进行测量。消耗能量与发射器和目标节点之间距离 d、发射器与邻居节点间距离 r、邻居节点与目标节点之间距离 x 以及发射节点转发数据包所消耗的能量 $f(A)$ 有关。发射节点能量需求最小化的公式为 $f(A)/(d-x)$，因为该公式最小的情况下所选择的下一跳消耗的能量最少。

Verdone等于2008年提出的地理与能量感知路由（GEAR）协议是一种基于位置的路由协议和以数据为中心的路由协议相结合的路由协议。该协议被广泛应用于位置感知网络中，在位置感知网络中通常需要发送特定的信息到特定的地理位置（见图5.4）。相比其他的以数据为中心的路由协议而言，GEAR具有更高的能量效率，因为它只向感兴趣的区域发送问询数据包而不是向整个网络泛洪发送问询数据包。该协议只针对那些基于需求采集数据，而不是定期向汇聚节点发送数据的应用。GEAR通过仅向感兴趣区域发送问询数据包而不是向整个网络发送问询数据包的方式，它实现了定向扩散协议中提出的感兴趣区域数的最小化。同时，GEAR在兴趣区域内递归地基于位置转发数据包

时利用能量感知的邻居进行选择。

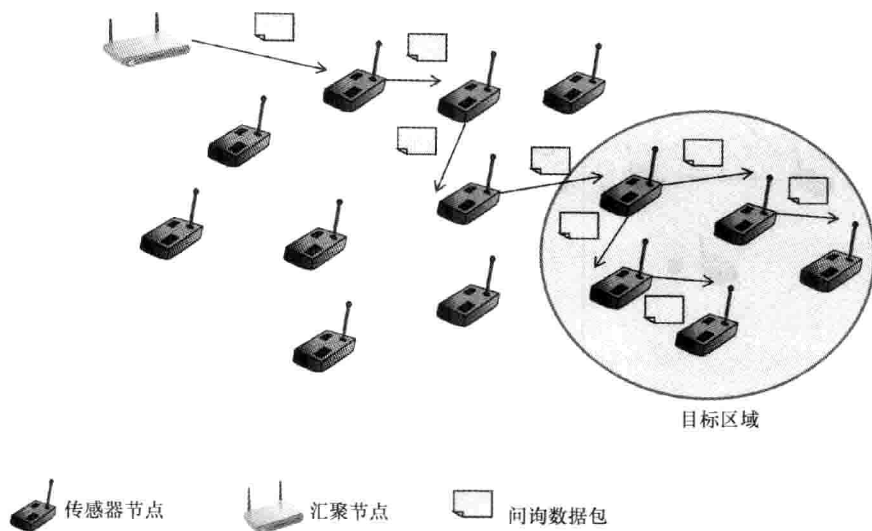


图 5.4 GEAR 协议：问询数据包转发至目标区域

2009 年，AboElFotoh 和 Hassanein 在 Oteafy 提出的基于动态选择的传感路由方法是一种用来检测无线传感器网络中一个节点是否被选中来报告或转发数据时的新方法（见图 5.5）。该过程是通过以分布式方法向合理选出的相邻节点传输数据，以避免冗余和不必要的传输。在该协议中，节点是否合适取决于节点的可靠性，即从该节点发出的消息成功到达汇聚节点的概率。节点的合适程度由其到汇聚节点的跳数和电池能量两个参数共同决定，每个参数根据其重要性被分配一个权重。如果给电池能量分配一个较大的权重，则需要在整个网络上进行负载分配，如果给跳数分配一个较大的权重，节点将选择到目标节点的最短路径（根据跳数）。当一个节点确定其合适度后，它将会设置一个计时器，计时器的长度与其合适度成反比，当它本身为转发数据包最合适节点后，它会一直向外宣称其是转发该数据包最合适的节点并且该过程一直重复进行直到数据达到目标节点。

能量感知路由协议是由 Shah 和 Rabaey 于 2002 年提出的，其目的在于延长网络生命周期。该协议与先前提到的定向扩散协议相似，不同的是它有几条路径可供选择并非只选择最优的那条路径。在可选择的几条路径中，选择哪一条路径是根据一定的概率来进行的，选择的概率取决于每条路径消耗的能量。该协议由三个阶段组成。首先是建立阶段，所有节点到目标节点的路径以及各自的能耗，并根据路径和能耗构建相应的表；下一阶段是数据通信阶段，路径选择的概率是在第一阶段的能耗的基础上进行；最后，第三阶段是路由维护，当局部泛洪的情况偶尔出现时保持路由表更新。

基于局部更新的路由协议（LURP）（Wang 等于 2007 年提出）是利用汇聚节点移动性这种思想提出的一种协议。在该协议中，当一个汇聚节点移动时，它只将其移动的

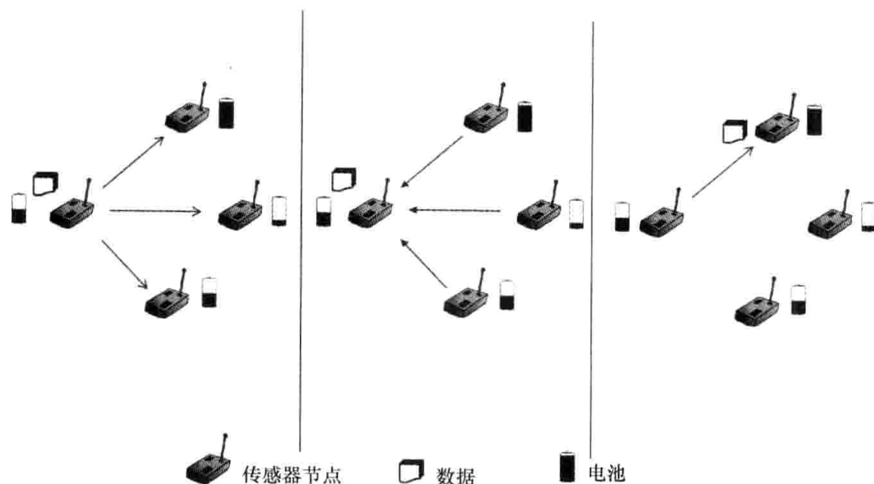


图 5.5 基于动态选择的路由

信息广播至一定的区域而不是整个网络，其目的是降低消耗能量和减少在网络中造成碰撞的概率。该协议是基于位置的层次化协议，它的工作方式是将汇聚节点置于一个虚拟中心（Wang 等于 2007 年提出）。当一个节点要发送一个数据包到汇聚节点时，它使用 geocast 协议向虚拟中心的一个节点发送数据，而后，该节点使用一种基于拓扑的协议将数据包转发到汇聚节点。基于局部更新的路由协议显著降低了网络中广播数据包的数量，从而降低能耗和拥塞，同时，也利用了三类传感器路由协议中两类传感器路由协议的优点。

5.1.3 分集协议

分集在通信系统中常用于弥补信号在无线信道中的衰落，因此，使用该技术可以提高可靠性。时间分集、频率分集、空间分集和多用户分集都已用于抗衰落。然而，Shariatpanahi 和 Aarabi 于 2007 年提出了另一种形式的分集，由于无线网络传播介质的共享性，这种分集在任何一个无线网络中都存在。在无线网络中，考虑到传播介质的自然属性，当一个节点向另一个节点传输数据包时，其他节点都能监听到此次数据传输。因此，其他节点接收到的数据可以用来提高传输的可靠性。这种想法也被运用于 Lenders 和 Baumann 于 2008 年提出的链路分集路由范例中。链路分集路由协议选择每一跳路由是中间节点达到目标节点的链路数量。这种决策在由于衰落而造成的链路传输失败的情况下最大限度地提高每一跳传输成功的概率，由于避免了更容易传输失败的路由传输从而产生更可靠的路径用作路由。分集路由于 2005 年还被 Mansouri 等用于降低传送功率和延长网络生命周期（见图 5.6）。在无线传感器网络中，为确保传输可靠性和保证数据能传输到汇聚节点，经常会出现路径冗余的情况，从而可以利用分集的优势来降低总能耗。这可以通过在网络路径冗余和容错之间进行折中来实现，因为二者直接相关。

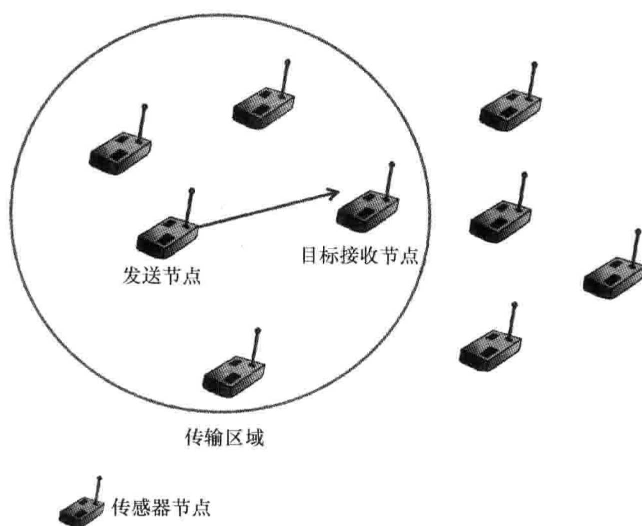


图 5.6　分集路由

分集路由被大量运用于协作路由中。协作分集是通过一系列协作节点以及合理分配传输功率来实现，研究结果表明，这有助于缓解衰落效应。

5.1.4　认知协议

随着认知技术在无线传感器网络中的运用逐步扩大（Vijay、Bdira 和 Ibnkahla，2010 年；Fortuna 和 Mohorcic，2009 年，Akan 等，2009 年，Boonma 和 Suzuki，2007 年；Niezen 等，2007 年；Reznick 和 Von Pless，2008 年；Shufhiang，2005），有几个协议已被开发来实现认知功能。由 El Mougy 和 El Jabi 等于 2010 年提出的认知信道感知路由（CCAR）主要针对无线传感器网络中数据包高丢失率的问题而设计的。这种节能协议可以降低丢包率，从而减少重传次数。当一个节点要发送数据到汇聚节点时，它广播一个 RREQ（根据网络节点密度进行调整，以实现传输功率最小化），然后，通过获取所有邻居信道参数，它可以确定需要达到某个指定邻居的最小功率。路径的选择是通过综合所需的发送功率和数据包丢失率两个指标来进行的。

Felemban、Lee 和 Ekici（2006 年）提出了一种被称为多路径、多速度的实时路由协议（MMSPEED）。该协议利用物理层和 MAC 层信息支持网络层。可靠性、时延和位置信息被传送到网络层，以确定数据包的转发。每个节点维护一个它到每个邻居节点的时延，利用时延信息和邻居节点的位置信息来计算到邻居节点所需的能量，而后选取最佳下一跳。该协议允许中间节点基于预先定义的指标值来确定路径的数目。当数据包被转发至目标节点时，MMSPEED 采用可提供服务质量（QoS）的定位机制和用于弥补局部决策失误的地理数据包转发机制，以此来满足确保可扩展性和适应性的端到端需求。

另一个提出的认知协议是成本和碰撞最小化路由（CCMR）和碰撞（Rossi、Bui 和

Zorzi 于 2009 年提出的），该协议也涉及物理层、网络层和 MAC 层。CCMR 检测由于在 MAC 层上竞争而产生的碰撞所造成的能量损耗，它旨在通过实现成功竞争概率的最大化，来确定具有成本最小化特性的下一跳协议。成本的大小取决于节点到目标节点的距离，为了尽量减少碰撞，发送节点发送一个 RREQ，以确定到目标节点的路径。然后，收到请求消息的节点确定竞争窗口大小，并采用一种能够避免碰撞和维持成功竞争的方式，来发送一条响应信息。具有最小竞争窗口的节点发送回复的信息将比别的节点发送的早，这样由于碰撞的可能性最小，从而减少了能量损耗。

下面，主要介绍由 El－Jabi（2010 年）最早提出的认知分集路由。

5.2 系统模型

本节介绍了适用于该系统的模型，这些模型指定了系统将要运行的环境。由于延长网络生命周期是本协议的主要目标，因此，在本节中提出了能量和传播模型，并对网络生命周期的定义进行了探讨量化。

5.2.1 传播模型

传播模型对于预测链路的路径损耗和评估周围的环境和条件是非常重要的。获取两个无线节点之间链路质量和状态的信息有助于确定链路的可行性和产生的路径损耗。传播信道的两个决定性因素是路径损耗和链路衰耗，路径损耗是接收功率与发送功率的分贝比，它在确定一个传输过程中所需的发送能量中起决定作用。目前，有两种类型的路径损耗统计模型：确定性和统计性模型。确定性模型只是根据发射和接收节点之间的距离来确定平均接收功率。

$$\overline{P}(d)=\overline{P}_0\left(\frac{d}{d_0}\right)^{-\alpha}\text{（线性刻度）}$$

$$\overline{P_{\mathrm{dB}}}(d)=\overline{P_{\mathrm{dB}}}(d_0)-10\alpha\log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

路径损耗（dB）可表达为

$$\overline{PL_{\mathrm{dB}}}(d)=\overline{PL_{\mathrm{dB}}}(d_0)+10\alpha\log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

式中 α——路径损耗指数，通常在 2～5 之间，其取值取决于环境；

d——发送节点到接收节点的距离；

d_0——参考距离。

统计性模型考虑到周围环境的变化，周围环境变化导致的衰落呈对数正态衰落，它可描述为一个均值为 0，方差为 σ^2 的高斯随机变量，路径损耗（dB）可描述为（Rappaport，2001 年；El Mougy、Bdira 和 Ibnkahla，2010 年）

$$PL_{\mathrm{dB}}(d)=\overline{PL_{\mathrm{dB}}}(d_0)+X_\sigma=\overline{PL_{\mathrm{dB}}}(d_0)+10\alpha\log\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma$$

接收功率（dB）为

$$P_{dB}(d)=\overline{P_{dB}}(d)+X_\sigma=\overline{P_{dB}}(d_0)-10\alpha\log\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma$$

几个能量模型在上面的传播模型文献中都有描述（例如，见 Kim B 和 Kim I 于 2006 年提出的和 Griva 等于 2009 年提出的文献）。

5.2.2 网络生命周期

无线传感器网络节点的特点是能源有限，特别是在控制或监测中应用时更是如此。因此，一旦部署完毕进行工作时，能够持续一段合理的时间是非常重要的；否则，整个网络将无法运行。为提高无线传感器网络的性能，大量的研究都集中在如何延长节点和网络生命周期这一方面。在此，有两个重要概念：节点生命周期和网络生命周期。节点生命周期基本上是一个节点的工作周期。每个节点配备一个能量源，如电池或其他能量源。节点生命周期也可以这样定义，即节点的能量高于某个阈值的时间，当节点能量高于这个阈值时，它可进行正常工作，如发送、接收或处理数据，一旦节点能量低于这个阈值，该节点无法运行，也就认为该节点失效。

而网络生命周期则是一个更复杂的概念，它会随着应用的不同而不同，在一些应用中，每个节点都是至关重要的，因此，一个节点的失效将导致整个网络失效。在其他应用中，网络中通常有冗余，这意味着有几个节点执行相同的功能或监控同一区域。一般而言，就绝大多数网络来讲，只要主干网络仍能继续工作，某些节点失效的情形是可以允许的。对于网络生命周期而言，有许多关于它的定义，因为它依赖于不同应用和配置条件。在这些定义中，最常用的定义为：从无线网络中的第一次传输到工作节点的百分比下降到某个指定阈值的时间间隔，阈值根据应用类型不同而进行相应的设置（Verdone 等，2008 年）。

深入分析上述定义，同时考虑到运营网络是由工作的节点和链路组成，网络生命周期的定义可分解成两个定义：基于连通性（CB）的定义和工作节点百分比（PAN）的定义。

1）基于连通性的定义：一个无线传感器网络的网络生命周期是从开始配置到开始发生网络分隔的时间段（Al - Turjman、Hassanein 和 Ibnkahla，2009 年）。网络分隔的一个例子显示在图 5.7 中。

2）有效节点百分比定义：一个无线传感器网络的配置完毕到有效节点的百分比下降到某个特定阈值的时间（Al - Turjman、Hassanein 和 Ibnkahla，2009 年）。

为了能够量化网络生命周期定义，在定义了网络生命周期后，下一步的工作就是获取性能指标。最常用的指标是：

1）首个传感器节点失效（FND）：这个指标用一个简单的方法来定义，就是网络中最早失效节点工作的时间。这一指标可用于每个节点都异常关键的应用中，但在其他应用中，在生命周期定义中给出一个下限是非常重要的（Ozgovde 和 Ersoy，2007 年）。

2）能量保持率（RRE）：总能量与所有节点的比率（Al - Turjman、Hassanein 和 Ibnkahla，2009 年）。

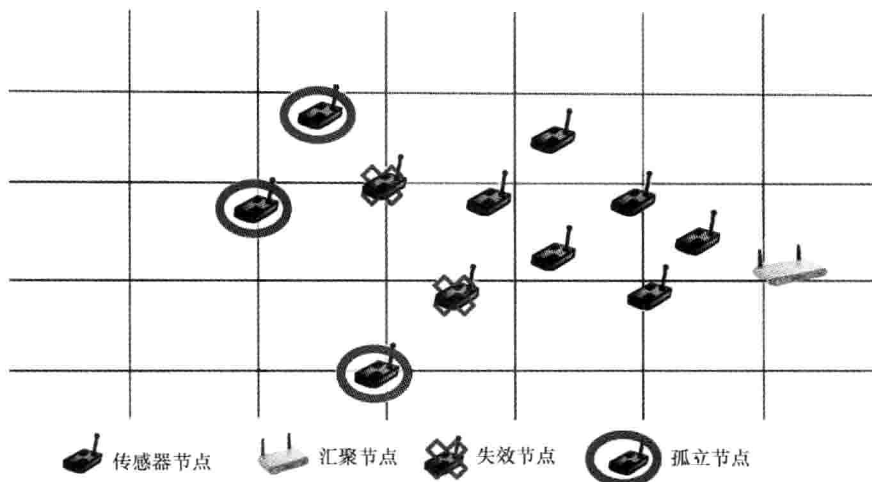


图 5.7 网络分隔

3）节点孤立率（Mizanian、Yousefi 和 Jahangir，2009 年）。

4）节点失效率（Al - Turjman、Hassanein 和 Ibnkahla，2009 年；Verdone 等，2008 年）。

这些定义用来量化网络生命周期，其目的是为能够对不同协议的性能进行评估，这将有助于对不同协议的性能进行评估，并确定哪一个协议是最适合用来延伸网络生命周期。

5.3 认知分集路由协议

本节介绍一种传播数据的能量效率路由协议，该协议的路由选择基于它们的能量、信道和流量状态。该协议最初由 El - Jabi（2010 年）提出，由于在传输过程中需要消耗大部分的能量，该协议在网络总体设计上实现了最大限度地减少传输数据包的数目，从而延长了网络生命周期，而这也正是该协议的主要目标。认知分集路由协议，正如名字所示，是一个融合了认知和分集路由两个概念的协议。

5.3.1 认知分集路由方法

认知分集路由（CDR）分为三个主要阶段：初始阶段、网络维护阶段和路由阶段。在初始阶段，建立网络基本链路且各节点间建立通信；在网络维护阶段，确保在网络节点发生变化时网络能够保持实时更新，这对防止信息过时很重要；路由阶段是最重要的阶段，在该阶段，做出传播数据的决定并选择从数据源到目标节点的路由。认知分集路由协议是一个主动式路由协议。主动式路由协议是表驱动路由协议，表驱动路由协议通过定期更新整个网络的路由表来维护目标节点和路由列表信息。图 5.8 阐述了认知分集路由。

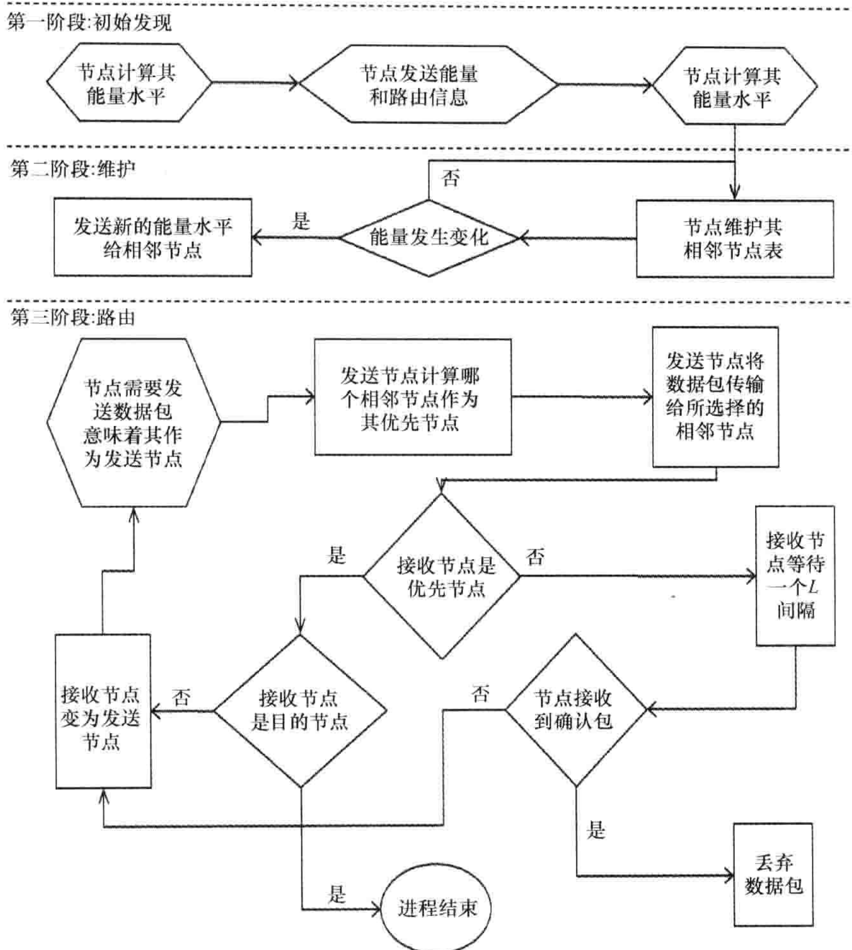


图 5.8　认知分集路由系统模型

1. 阶段 1：初始发现（Initial Discorery）

认知分集协议的第一阶段是初始发现。在该阶段，网络中不同节点间建立通信并初始化它们的路由表。每个节点的首要任务是计算其目前的能量。从物理层获得信息的方法就是实现该路由协议认知化和智能化所采用的方法。

节点的下一步工作是开始将信息包传输给它所有的邻居节点，目的是交换信息并了解网络中其他节点，这种方式是通过泛洪方式进行的，每个节点发送一个泛洪数据包。该数据包格式如图 5.9 所示。

节点地址	节点纬度	节点经度	时间戳	电池电量

图 5.9　泛洪数据包格式

这种格式允许节点具备 GPS 功能，以便可以通过传输地理信息从而有助于其进行路由处理。

当泛洪数据包发送以后，每个节点能够构建路由表来保存所有有关网络中节点的信息。构造的两个表分别为邻居表和目标节点表。邻居表用于存储关于它相邻节点的信息，在后来路由选择中确定下一跳时会使用，邻居表包含了相邻节点的能量水平和流量情况，这两个参数是路由阶段的重要参数。当某个节点需要确定数据包的目标节点位置或者它作为中间节点需要将数据包路由到指定位置时，就需要用到目标节点表。邻居表和目标节点表的结构在下面两部分进行描述。

2. 阶段 2：网络维护 （Network Maintenance）

主动路由协议的特点是节点周期性地发送更新。在认知分集路由中，这些数据包并不是周期性地发送，而是当节点能量状态发生变化时才发送数据包。一个节点的能量状态被分配了 3bit，因此节点的电池水平状态共有八级。当节点的电池水平从一个状态下降到另一个状态时，它发送 HELLO 数据以便相邻节点表更新表信息，更新数据包只是周期性地发送或者能量状态发生比较大的变化时才发送，这样做的目的是最大限度地减少传输的数量，因为，在主动系统中，主要的缺点就是持续地发送更新数据包会使电池电量下降。节点同时将其接收到的数据包的数量发送给邻居节点，这将会在路由阶段进行运用。在这一阶段，节点进入休眠模式以保存能量，只有在发送或接收数据包时才被周期性地唤醒。HELLO 数据包结构如图 5. 10 所示。

节点地址	节点纬度	节点经度	类型	时间戳	电池电量	接收到的流量

图 5. 10　HELLO 数据包结构

3. 阶段 3：路由 （Routing）

路由阶段主要是确定传输数据、确定路由和下一跳节点。在此阶段，前两个阶段收集和存储的信息都用来确定数据包的传输路由。在路由开始之前，将初始化数据包报头格式，其格式如图 5. 11 所示。

目标地址	优先级别	距目的地距离	目的地纬度	目的地经度	时间戳	途径节点链

图 5. 11　数据头格式

节点的遍历指针对于防止在网络中循环是非常重要的，这个列表用来消除在邻居表被指定为下一跳的入口。

当节点接收到数据包时，它会根据数据包而采取相应的行动。首先，节点检查数据包的目标节点地址以确保它不是该数据包的接收方，然后节点扫描目标节点表以确保数据包的目标节点确实存在并且是有效的；否则将该数据包丢弃。如果节点是数据包的中

间节点或发送数据包的源节点，下一步将是确定下一跳，在确定下一跳时，节点先清除相邻表中所有的失效路径，以避免失效的路由。之后，节点遍历表消除以前的节点以避免在网络中形成循环，而后节点检查它的邻居表以防它的某个邻居节点就是数据包的目标节点。

当这些步骤完成后，下一阶段将从剩余的邻居节点中选出适合作为最佳下一跳的节点。被选为最佳下一跳的节点被指定为优先节点，5.4 节详细探讨了优先级节点的选择。由于具备三个优先级节点会提高协议的鲁棒性和降低邻居节点重传的概率，因而减少了发送节点的数目。然后，需要将数据包以广播方式发送给所有邻居节点，并为重传设置一种或多种优先级。

下一步是如何处理接收的数据包，当节点接收到数据包时，它会检查数据包报头来确定它是否为优先邻居节点。如果它是优先节点，则它决定下一个优先地址并将消息转发至所有的下一跳邻居节点。信息转发完毕后，它立即广播一个 ACK 消息，目的是通知其他非优先节点，目前它们处于超时状态。这是因为，如果节点从数据包报头判定它并非优先节点，它会触发一个超时机制，根据该机制规则，它会等待一个特定的时间段用来接收从优先节点发送的 ACK 包。如果节点在该时间段内接收到 ACK 包，它将把接收到的数据包扔掉；如果在该时间段到达后却没有收到一个 ACK 数据包，它会继续转发该数据包，这是为了确保在传输失败或节点失效的情况下仍能保证传输的可靠性、鲁棒性和容错性。

5.3.2 基于 OPNET Modeler 15.0 的实现

在网络仿真软件 OPNET Modeler 15.0™ 中对认知分集路由协议进行测试，OPNET Modeler 15.0 能采用仿真的方式进行分析和比较网络在不同环境中采用不同设计时的端到端行为，同时它也具备模拟大范围网络类型和技术的开发环境。由于它支持用户在每一层上都对协议进行设计，因此，它充分考虑了建模中的总体控制和多种实现方案，特别是对于跨层设计或认知技术来说尤其如此，因为它支持用户设计每层的协议。OPNET 配备了详细且健壮的离散事件仿真器，它可收集网络统计数据以充分验证和评估系统性能。它既可以对大范围网络级进行性能指标测试，也可以对节点级进行性能测试，甚至可以对网络中发送的每一个数据包性能进行测试。OPNET 中使用的编程语言是 C ++，这对于将在 OPNET 中编写的程序移植到硬件级或其他程序是非常重要的，因为 C ++ 是最流行的编程语言。

该协议是在进程模型来实现，它通过有限状态机（FSM）定义了各模块的行为。有限状态机（FSM）通过状态和转换确定模块对一个事件响应所进行的行动。FSM 的每一部分都附有 C ++ 代码片段，这些代码片段详细指定了当一个事件发生时所具备的功能。当某个事件发生时对模块的影响，仿真内核是通过一个中断来将控制器交给进程模型的，进程模型通过状态和执行嵌入式 C ++ 片段编码之间的转换来响应事件，而后将控制器返回仿真内核。CDR 的进程模型如图 5.12 所示。

进程模型和有限状态机（FSM）实现了上述描述 CDR 的三个阶段。初始发现阶段

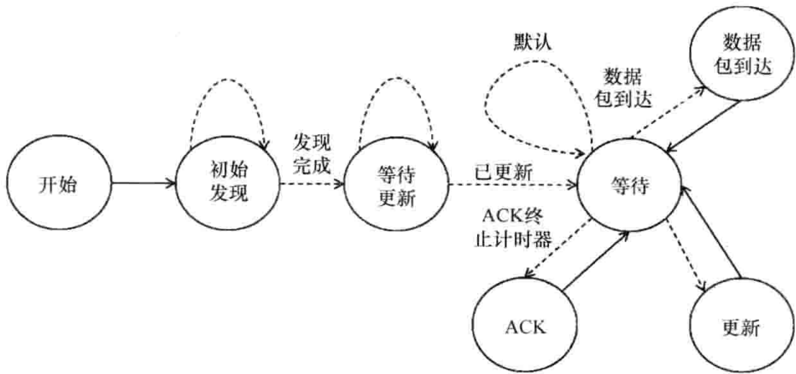


图 5.12　CDR 的进程模型

功能在有限状态机中实现，而网络维护和路由阶段则在剩余的有限状态机中实现。该模型为协议的运行提供了一个无缝且合乎逻辑的结构。

5.3.3　认知分集路由代码

本节提供了认知分集路由协议在 OPNET 中实现的代码。

#Start Process

Initialize node

Set battery level

Initialize routing tables

Reset traffic and all counters to zero

Obtains an address based on its ID

Obtains position from GPS (if available)

Set transmission power

#Initial Discovery Process

Node obtains battery level

Flooding packet is formed

Inserts battery and position information into flooding packet

Inserts address and timestamp into flooding packet

Broadcasts flooding packet

Calculate transmission cost

Update battery

Update packet transmission statistic

If flooding packet received

　　Process received packet

　　If timestamp has expired

Drop packet

Else

Obtain address of the source node

Compare address to existing addresses in routing table

Set neighbors in neighbor table and the rest in destination table

If address does not match addresses in table

Add new row in table for the extracted address

Else

Go to existing row for address

Extract battery and location information

Add information to routing table for the relevant address

From received power find the shadowing variance

Update table with the channel information

Calculate the received power from the packet

Update battery

#Wait Process

Node enters wait mode

If there is a change 认 energy level

Initialize update packet and set packet type to Hello

Insert address into packet header in addition to location information

Obtain number of packets received from counter and add to packet

Measure new battery and add to packet

Insert timestamp at end of packet

Transmit packet to neighbors

Calculate transmission cost and update battery

Update packet statistics

If there is data to transmit

Initialize data packet and set packet type to Data

Insert address and location information into header

Obtain destination information from destination table

Insert destination address and location into packet

While iterating through all entries in neighbor table

If address of entry is in traversed list, ignore entry

Else

Obtain energy, traffic and channel info of entry

Calculate priority factor

```
            Calculate distance to destination
    Find highest, 2nd and 3rd highest priority factors in entries
    Set the three priorities in packet header
    Calculate distance to destination for determining relay region
    Add node to list of nodes traversed and append list to packet
    Insert timestamp at end of packet
    Transmit packet
    Calculate transmission cost and update battery
    Update packet statistics
  If packet is received
    Process packet and obtain type
    If packet type Hello
      Obtain address from packet header
      If timestamp has expired
        Drop packet
      Else
        Obtain address of the source node
      Compare address to existing addresses in routing table
      Set neighbors in neighbor table and the rest in destination table
        If address does not match addresses in table
          Add new row in table for the extracted address
        Else
        Go to existing row for address
      Extract battery and location information
      Add information to routing table for the relevant address
      Calculate the received power from the packet
      From received power find the shadowing variance
      Update table with the channel information
      Calculate reception cost
      Update battery
  If packet data packet
  Process packet and obtain destination information
    If node is destination
      Obtain info, update statistics and battery then destroy packet
    Node is an intermediate node
    If destination does not exist destination table
      Drop packet
```

If address is present in list of traversed nodes

　　Drop packet

Obtain priority addresses from packet header

If node is first priority

　　　　Go to data transmit function

　　　　Transmit ACK

　　　　Update battery and statistics

If node is 2nd priority

　　　Wait timeout T

　　　If ACK is received

　　　　　Drop packet

　　　　Else

　　　　　Go to data transmit function

　　　　　Transmit ACK

　　　　　Update battery and statistics

　　　If node is 3rd priority

　　　　　　Wait timeout 2xT

　　　　　　If ACK is received

　　　　　　　Drop packet

　　　　　　Else

　　　　　　　Go to data transmit function

　　　　　　　Transmit ACK

　　　　　　　Update battery and statistics

　　　　Else

　　　　　　Wait timeout 3xT

　　　　　　If ACK is received

　　　　　　　Drop packet

　　　　　　Else

　　　　　　　Go to data transmit function

　　　　　　　Transmit ACK

　　　　　　　Update battery and statistics

　Else

　　Node enters sleep cycle

　　Energy consumption is calculated

　　Battery updated for every day

5.4 优先节点选择

选择最佳下一跳或优先节点的标准基于三个参数：能量参数、信道参数和流量参数。这些参数代表了一个节点在对确定最佳下一跳做出智能决策之前要考虑的所有内容。

能量表由接收节点的能量水平和发送节点本身的能量水平组成。节点通过反复检查邻居表来确定最佳接收节点。这是通过采取从邻居表中获取的邻居节点的电池电量 P_{NBR} 减去预估的接收能量 P_{R0} 来确定。这个值代表的邻居节点可以接收数据包的预估电池电量，用 P_{NBR-E} 表示，即

$$P_{NBR-E} = P_{NBR} - P_{R0}$$

对于每个邻居节点而言，从节点到某个邻居节点估计传输成本 P_{T-E} 等于从节点的当前电池能量 P_N 减去估计的传输成本的 P_T（d）。

$$P_{T-E} = P_N - P_T(d) = P_N - P_{T0} - A \times d^{\alpha}$$

式中，A 和 P_{T0} 是常数（见第 5.2.1 节）（Kim B 和 Kim I，2006 年；Wang 和 Yang，2007 年；Molish 等，2009 年）。

结合估计发送能量和估计接收能量可以产生能量方程，它等于

$$E_P = P_{T-E} + P_{NBR-E} = P_N + P_{NBR} - P_{R0} - P_{T0} - A \times d^{\alpha}$$

信道参数为节点提供了相应的信道信息，目的是使节点能够考虑链路状态。当评价链路质量时，遮蔽效应是一个很重要的考虑因素，因为它能确定是否存在妨碍传输的障碍。基于传播模型，通过获得数据包在链路中传输的接收功率、遮蔽效应，从而发射节点 i 和接收节点 j 之间信道参数的 C_p 可以用对数正态变量的方差 X_{σ} 表示，即

$$C_p = \sigma_{i,j}^2$$

最后要考虑的参数是流量参数。流量参数提供了一个节点接收数据包的统计量。该参数通常用来避免拥塞和潜在的流量瓶颈，比如有时几个节点会同时发送数据到相同的节点，这样将会在接收的节点上造成碰撞和能量压力。同时，在随机部署过程中，一个节点选择的路径可能会是其他节点的唯一选择路径。因此，该参数将有助于避免发送数据包到这些节点。Trb_{NBR} 是邻居节点收到数据包的数量，该值可从邻居表中获得。将 Trb_{NBR} 除以整个网络数据包的总估计量即可得到流量参数，而整个网络中数据包的总估计量等于

$$btr \times t \times K$$

式中 btr——节点发送率；

t——时间；

K——网络节点数目。

流量参数 Tr_p 为

$$Tr_p = \frac{Trb_{\mathrm{NBR}}}{btr \times t \times K}$$

因此，结合所有三个参数，可以得到以下方程并通过该方程来确定优先节点：

$$\mathrm{Priority}_N = k_1 \times E_p - k_2 \times C_p - k_3 \times Tr_p$$

$$\mathrm{Priority}_N = k_1 \times (P_N + P_{\mathrm{NBR}} - P_{\mathrm{R0}} - P_{\mathrm{T0}} - A \times d^{\alpha}) - k_2 \times \sigma^2 - k_3 \times \left(\frac{Trb_{\mathrm{NBR}}}{btr \times t \times K}\right)$$

式中　k_1，k_2，k_3——分配给每个参数的权重。

结合邻居节点能量水平、链路条件和网络的流量参数这三个参数，可以使节点拥有其能量水平的最新更新信息。获得优先选择方程后，下一步将确定三个权值 k_1、k_2 和 k_3，以最大限度地提高网络的生命周期和优化选择最佳优先级节点的过程。因此，最佳节点的选择会根据设计者的需求来制定为一个优化问题。例如，设计者可以把更多重点放在能量或信道参数上等。

5.5　性能评估

本节主要内容是利用 OPNET 15.0 仿真工具对认知分集路由（CDR）协议的性能进行测试。在对 CDR 性能进行测试时是与地理随机转发协议（GeRaF）性能进行比较的，目的是测量 CDR 的效率和优势。GeRaF 是一种广泛使用的基于位置的路由协议，它利用节点的 GPS 功能并基于距目标节点的距离来选择一个路由。两种协议在不同场景的相同条件下进行测试，选择不同的场景是为了测试两种协议在不同条件下和不同应用中的性能，这样可以从总体上得出每个协议的优势和不足。

场景配置区域的大小为 1.5km×1.5km，每个节点的传输范围约为 500m，针对每种场景，传输频率在 1~24 次/天之间变化，即传感器节点每小时都要发送数据。这是对不同流量强度网络的模拟。流量的产生是每个发送节点根据指定的每天发送一定数量的速率进行发送，并且所有的数据都是发送给汇聚节点。

网络中模拟的流量代表了在环境监测应用中的流量（Ibnkahla，2010 年），所以给出的数据包格式图 5.13 所示。每个数据包的大小是介于 136 位和 200 位之间的一个随机值，它代表了根据刚才所给数据包的格式为 15~25 字节的大小。这些变化范围值表示需要发送给汇聚节点的传感器读数的规模。路径损耗指数通常采用 3，除非另有规定，这代表了这类应用的典型和实际环境（见表 5.1）。

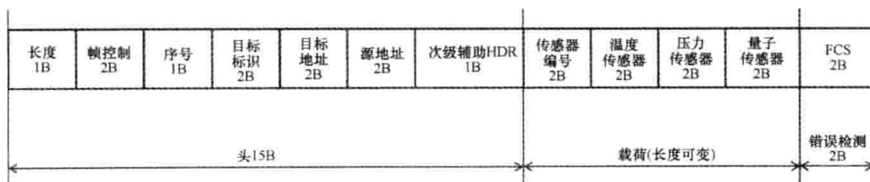


图 5.13　数据包格式

表 5.1 试验场景的物理参数

参数	值
区域	1.5km×1.5km
节点传输距离	500m
数据包大小	136~200bit
调制方式	DPSK
噪声系数	1.0
传输带宽	22kHz
路径损耗指数 α	$\alpha=3$

在下面的模拟中，三个目标函数的权重是根据注重能量参数进行优化的（能量参数优化）而得到的。通过一个优化的方法得到的数值：$k_1=8.57$，$k_2=5.71$ 和$k_3=5.71$。

模拟的两个主要指标是首个节点失效（FND）时间和网络生命周期。FND 在监控应用中是至关重要的，因为每个节点都会中继信息，且其他节点无法对其进行补偿。因此每个节点在监控应用中发挥着重要作用，其目标是延长每个节点的生命周期。FND 同样也有助于阐明认知分集路由（CDR）协议表现的协同路由和分集性，因此 FND 是描述协议的一个重要指标。网络生命周期指标是主要的目标，开发 CDR 协议的目的就是延长网络生命周期。早期的环境网络生命周期的定义解释为网络生命周期的定义，网络生命周期的阈值通常取为 40% 或当网络被分隔后一组节点无法到达汇聚节点。模拟主要在三个不同的配置场景中进行：网格部署、强制路径部署和随机部署。

5.5.1 网格部署

第一种场景选定为在 1.5km×1.5km 面积大小上放置 21 个节点的网格形式。在 21 个节点中，有 20 个节点是发送节点，另外一个节点是汇聚节点，网格中所有的流量都流向汇聚节点。网格部署是展示协议优势很好的一个方法，因为在网格部署中到汇聚节点有许多不同的路径，由此，它允许一个协议充分显示它在选择从源节点到目的地最优路径的一系列灵活性。节点在网格中的配置如图 5.14 所示。

第一次模拟的目的是在指定的条件下计算两个协议的首个节点失效（FND）时间和网络生命周期。

如图 5.15 所示，CDR 的 FND 明显高于 GeRaF 的，这是由于在 CDR 中有路由的认知因素。在 GeRaF 中，所有路由的选择都是基于静态的参数，因此，该协议不能适应网络和环境的变化。在仿真开始时，作为最佳转发的节点随着流量的增强而导致超负荷，从而造成了它们很快失效。另外，CDR 可以适应网络的变化，可以使流量均匀分布，也造成了能量的损失在整个网络中是均匀分布的。网络生命周期的测试如图 5.16 所示。

CDR 协议的网络生命周期也比 GeRaF 的网络生命周期要长，CDR 的认知功能使它总是选择最小能耗的路径，这将导致负荷平均分布，也导致许多不同的路径选择，这减

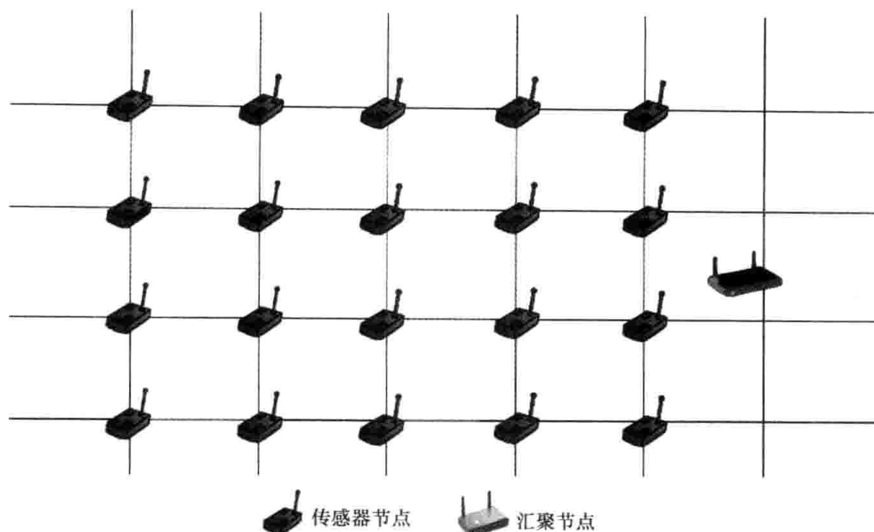


图 5. 14　网格部署

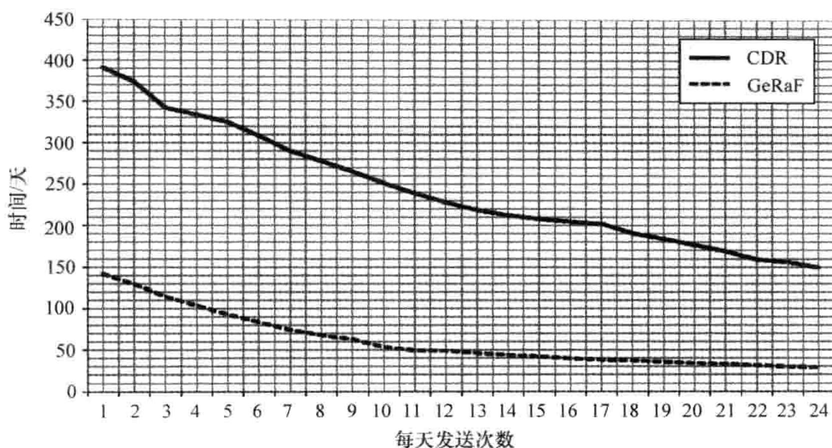


图 5. 15　网格部署的 FND

少了网络分隔和隔离的机会，从而延长了网络生命周期。从图 5. 15 和图 5. 16 中可以明显看出 CDR 的 FND 和网络生命周期接近程度比 GeRaF 更为明显。为进一步说明这一点，将每个协议的 FND 和网络生命周期绘制在相同的图上，如图 5. 17 和图 5. 18 所示。

图 5. 17 和图 5. 18 表明在 CDR 的网络生命周期和 FND 之间的间隔比 GeRaF 要少得多，这也验证了以前所说的在 CDR 中流量更加均衡，出现首个节点失效的时间距离网络生命周期仅为 8% ~22%，而在 GeRaF 这个值却达到 188%。同 CDR 相比，GeRaF 的这种极性会导致流量的拥塞，因为它总是通过一条狭窄路径进行传输，从而导致了网络

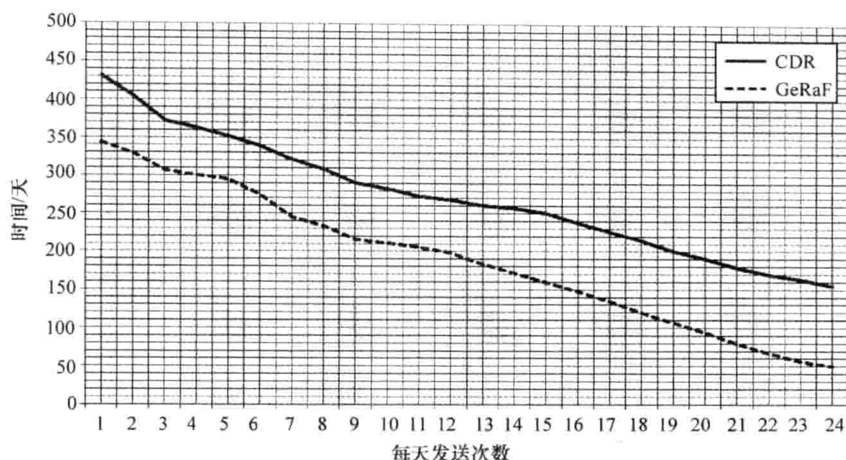


图 5.16 网格部署的网络生命周期

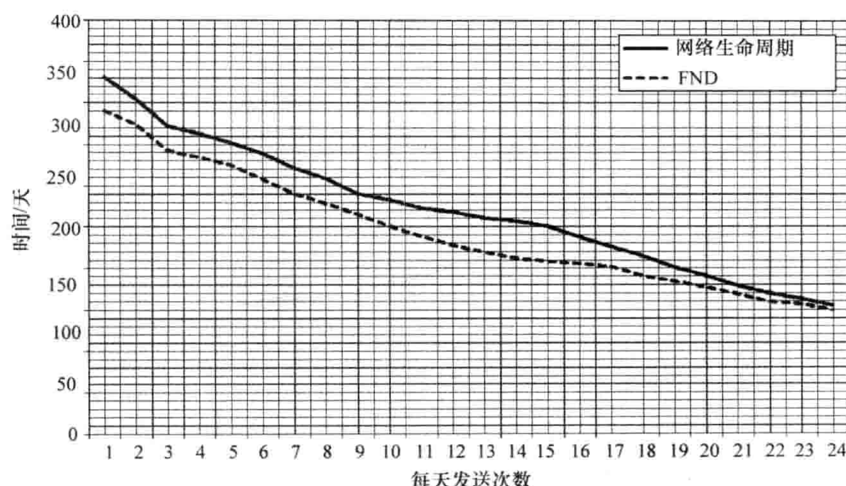


图 5.17 CDR 的网络生命周期与 FND 之间的关系

分隔的发生，也降低了网络生命周期。为了进一步探讨这一问题，对网络中每个节点的电池经过 100 天后的电量进行测试，测试结果如图 5.19 所示。

图 5.19 所示的电池电量分布表明：对于 GeRaF 协议而言，不同节点电池电量有更大的差别，而对于 CDR 所有节点电池的电量则在同一个范围内，这更证实了刚才对于流量均匀分布和能耗均匀分布的两个观点。

对于 CDR 而言，均匀分布主要是由于 CDR 有认知和智能的功能。在每个传输过程中，节点计算出最佳的优先级节点，这意味着在每一个传输中，CDR 评估所有可能的选项，然后选择最小能耗路径进行发送。为了验证这一说法，同时也为了表明两协议之

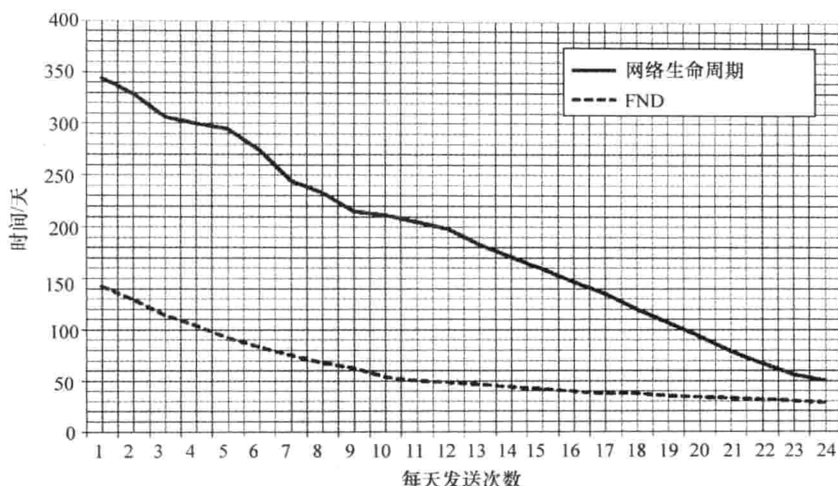


图 5.18 GeRaF 的网络生命周期与 FND 之间的关系

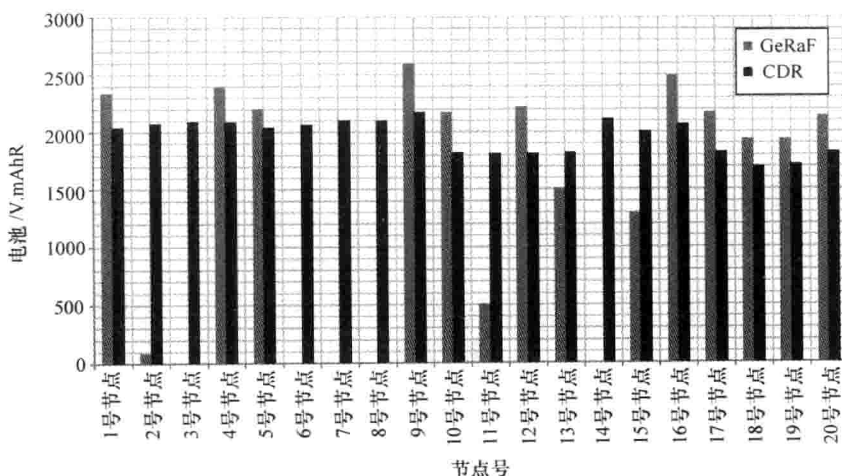


图 5.19 100 天后电池电量消耗

间的不同，对选取路径的数目进行测试。

图 5.20 记录了从每个节点到目标节点的路径数的记录。由于从末端节点到汇聚节点有多种可能性，因此，处于网格边和距汇聚节点最远的节点具有最多的可能传输路径。正如本节开始所提到的，网格部署的主要优点是它为源节点提供了到目标节点多重路径的选择，CDR 试图从众多路径中找到成本最低的路径，这样可以使 CDR 发挥它的优势。可用路径数量越大，可供选择的路径就会越多，就会有更好的路径选择，从而减少对那些被大多数源节点遍历的节点的过度使用。由于认知方面涉及能量参数、信道参数和流量参数，通过避免拥塞、条件差的信道和具有低电量电池的节点，可以非常容易

地选出传输路径。然而，从图 5.20 可知，可能有一点需要引起关注，更大数量的路径可能会对跳数和时延造成影响。因此，对从源节点到目标节点在每个节点的跳数进行了测试，结果如图 5.21 所示。

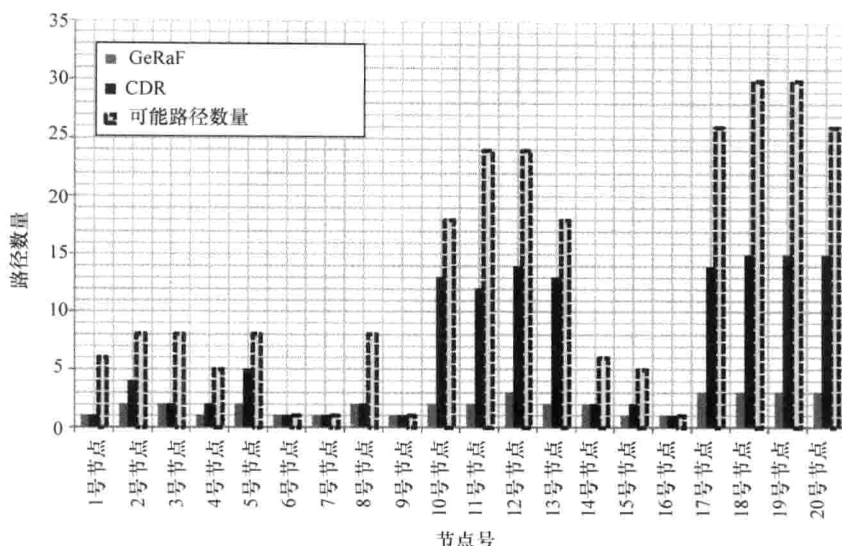


图 5.20 到目标节点路径数量

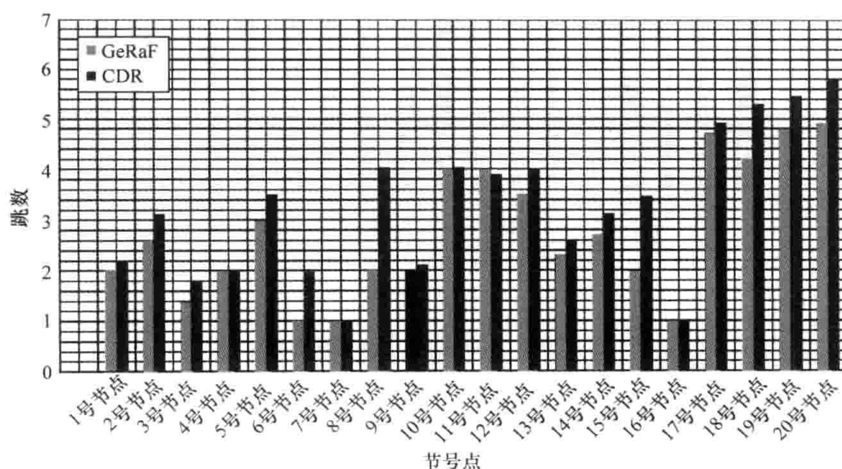


图 5.21 到汇聚节点的跳数

图 5.21 显示，即使图 5.20 显示每个节点到达目标节点路径数量较大，但它到汇聚节点的跳数并不是很大。这一点很重要，因为它消除了 CDR 协议一个极端的情况，在极端情况下，由于节点需要很长的路径和多跳才能到达目标节点，就达不到网络传输能耗最小的目的。在 CDR 协议的跳数只是比 GeRaF 略微大些。有时，为更好地避免那些

拥有明显流量拥塞和信道条件较差的中间节点，采取增加额外一跳的方法是合适的。

需要关注的另外一个问题是由于传输路径较长和额外的多跳带来的端到端的时延。在此，选择节点17和节点19两个节点来测试数据包发送给汇聚节点的端到端的时延。选择这两个节点的原因是它们位于网格的边，它们具有最长的传输路径和最大的跳数。

在图5.22中，前40天，两种协议的时延几乎是相同的；然而，40天之后，CDR会表现出0.1~0.15s额外的延时。在最初的40天里，节点17周围的所有节点能量下降到几乎是同一水平，所以CDR和GeRaF选择的路径是非常相似的；然而，在网络运行一段时间后，流量和能量会随着网络的运行发生变化，由于CDR采取了更长的路径来避免拥塞区域和重负载中心节点，所以其延时会增加。在第89天，有一个额外的0.05s的时延，这是由于分集路由在选定的优先级节点无法发送时会等待0.05s选取下一个优先级节点进行发送，从而造成整体额外的延时。

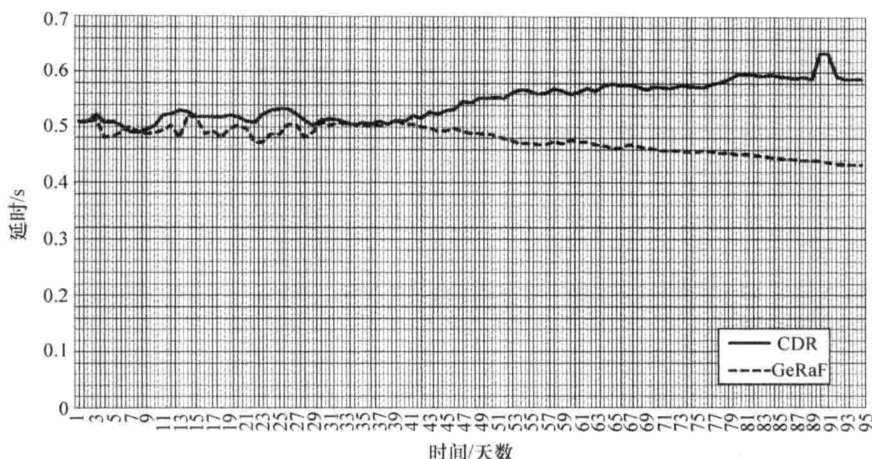


图5.22 17号节点到汇聚节点的延时

在图5.23中，CDR的时延多于GeRaF的时延一直在0.1s左右。这是因为初始化阶段后，GeRaF选取的最短路径需要通过容易发生拥塞的中心节点，而CDR则会采取额外多跳的方法避免这些节点，从而会导致额外的时延。

因此，尽管CDR比GeRaF协议有更多的路径和更大的跳数，但它仍然成功避免了路由过程的两大主要缺点。第一个缺点是更大的跳数意味着更多的节点发送数据，但这并不能说明消耗了更多的能量，因为研究结果表明，分配负载会导致总能耗成本在整个网络内进行平衡，从而延长了网络生命周期；第二个缺点是端到端延时的增加，由于额外的跳数和额外的处理能力所造成的时延没有超过最佳时延的26%，这种时延对于一个主要目标不是追求迅速或端到端时延的应用而言，是一个完全可接受的范围。

如图5.24所示，CDR和GeRaF协议的吞吐量在54天以前的时间段内几乎是相同的，这表示GeRaF协议的FND为54天。从第54天开始直到第201天网络失效期间，随着网络节点的失效，其吞吐量也在下降。在以每天传输12次的传输速率进行发送时，

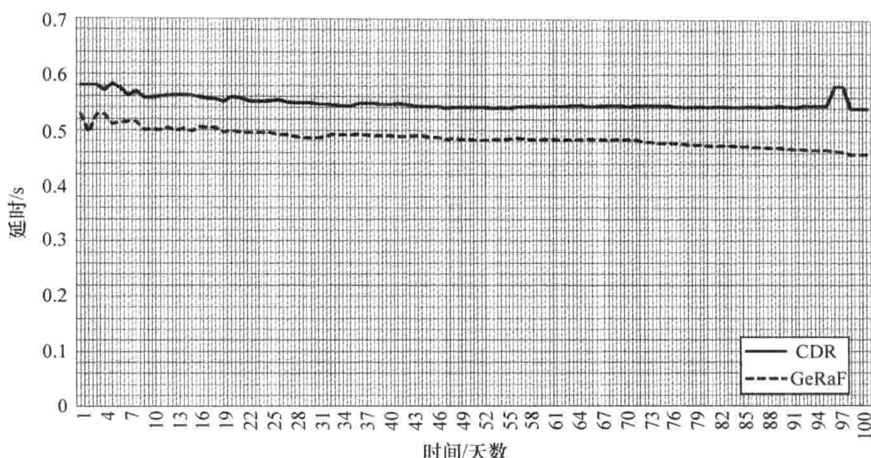


图 5.23　19 号节点到汇聚节点的延时

GeRaF 网络生命周期为 187 天。图中，吞吐量在更长的一段时间内是稳定的，这是由于网络生命周期被定义为网络发生隔离的情况或网络中 40% 个节点失效。然而，在这种情况下，即使网络发生隔离，仍有一些节点能够传送到汇聚节点。在 CDR，吞吐量一直稳定到 222 天首个节点失效。然而，与 GeRaF 不同的是，在 CDR 中，只有失效节点无法传输数据，而分集路由机制不允许数据包被丢弃，相反，数据仍然在超时机制被激活后发送到目标节点。

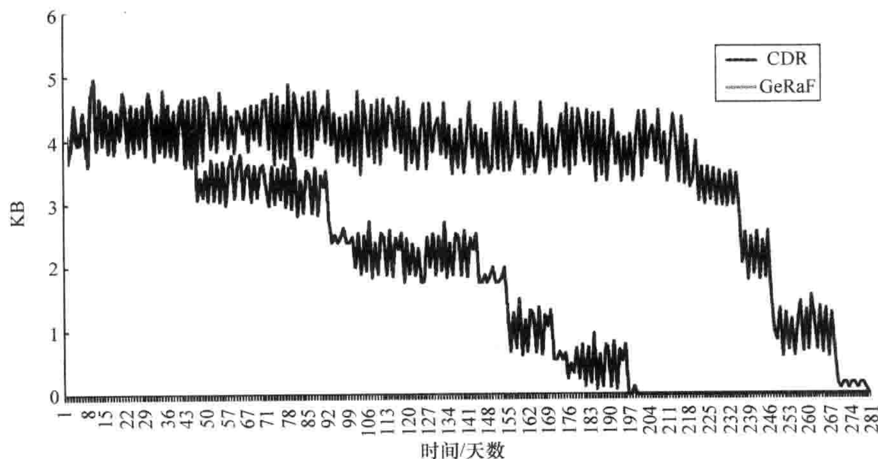


图 5.24　吞吐量

5.5.2　强制路径部署

上述仿真的场景是网格部署，在网格部署中节点发送数据时可以从很多路径中选

择，这导致了 CDR 协议的性能要比 GeRaF 好得多，因为它有许多不同的可选路径并由此最大限度地提高了网络生命周期。然而，由于在网格场景中的节点有许多可供选择的传输路径，它可以归类为一个极端的例子，同样，在另外一个极端情况下对协议进行测试也是很重要的，另一个极端是节点可选择的路径被完全限制的。下面的场景描绘了这种极端的例子，在场景中，节点被分成不同的群簇，各群簇之间的连接通过两个节点的“桥接”相连，从而限制了下一跳只有通过两个节点进行。这种场景如图 5.25 所示。

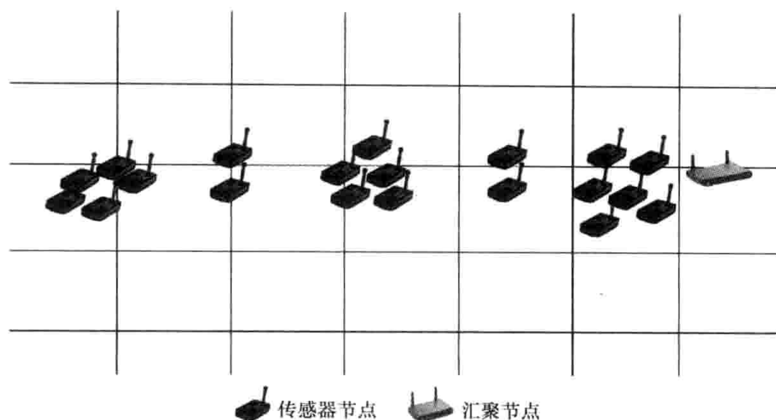


图 5.25　强制路径部署

为了测试在这种极端情况下的 FND（见图 5.26）和网络生命周期（见图 5.27），仿真在同样的场景中进行。

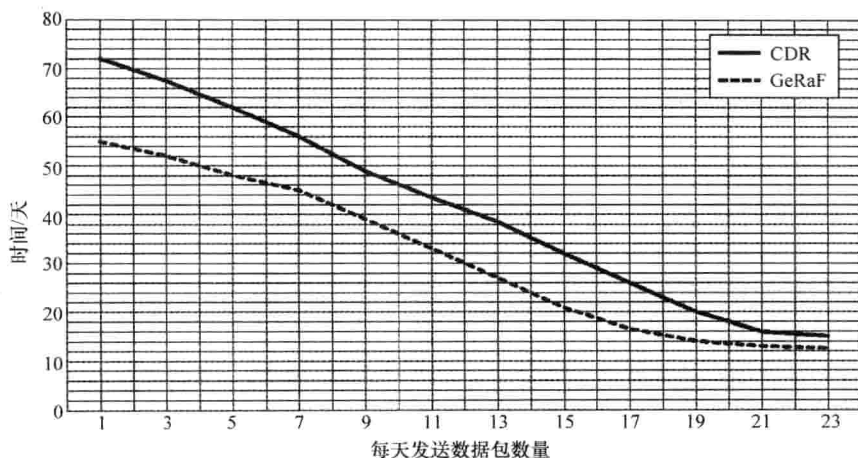


图 5.26　强制路径部署的 FND

图 5.27 所示的结果是完全可以预测的：两个协议的网络生命周期是相同的。然而，图 5.26 的结果显示，CDR 的 FND 大于 GeRaF 的。在这个场景中，发生了下面的过程，

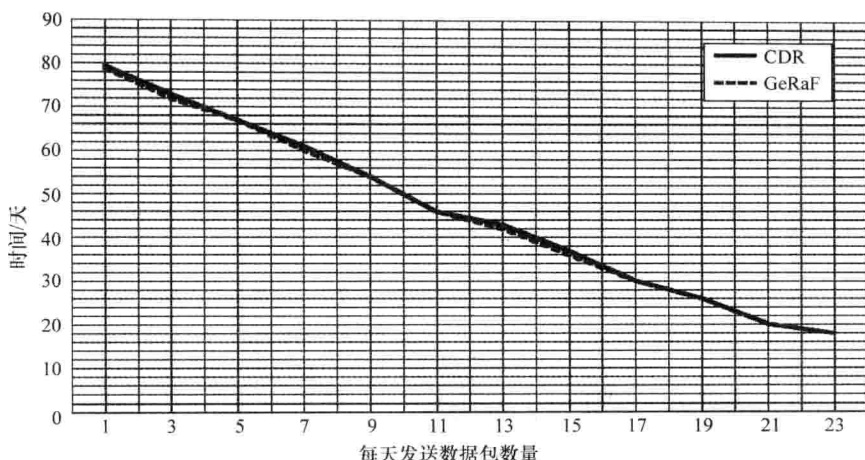


图 5.27　强制路径部署场景中的网络生命周期

首个群的节点要发送数据时必须通过节点 11 和节点 18，第二个群的节点要发送数据时必须通过节点 5 和节点 9 发送。每个群只有两条传输路径，这就是为什么两个协议网络生命周期是相同的，一旦节点 11 和节点 18 或节点 5 和节点 9 失效后可以致使网络分隔，整个网络就被认为是失效的。然而，两个协议的运行模式可以从 FND 图中明显看出，在 GeRaF 中，首先向距它最近的桥接节点中发送，直到这个节点失效后才转移到另外一个桥接节点，而在 CDR，传输的负荷是均交分布在两个桥接节点上的，因此两个桥接节点失效的时间大致相同。这种场景的重要性在于它给出了瓶颈情形中两种协议的主要特性。

在无线传感器网络中，并不是所有的应用都是按照网格进行配置的，有些应用是随机部署的，在随机部署中，会出现一小群节点和强制路径的情况，因此需要考虑这种情况。

5.5.3　随机部署

一些无线传感器网络应用采取的是随机部署而不是网格部署。随机部署是网格部署和路径强制配置两类配置的交叉；一些节点有许多不同的路径到目标节点，而有些距离比较远的或比较孤立的节点则只能通过强制路径发送给汇聚节点。在前面两节中介绍了网格部署和和强制路径部署两个部分后，为了测试的完整性，测试两种协议在这种情况下的性能是比较重要的。节点被随机分布在 1.5km × 1.5km 的网格中，如图 5.28 所示。

图 5.29 和图 5.30 分别显示了两种协议的 FND 和网络生命周期性能。从图中可以看出，CDR 在 FND 和网络生命周期方面的性能要比 GeRaF 好得多，这样的结果符合预期，综合两种协议在网格部署和强制路径部署的性能表现可以得出这样的结果。随机部署的网络生命周期为 103 天左右，要低于网格部署的网络生命周期，在网格部署中，所有的节点都有几条路径选择，而在随机部署中，一些节点只有强制路径可供选择，从而

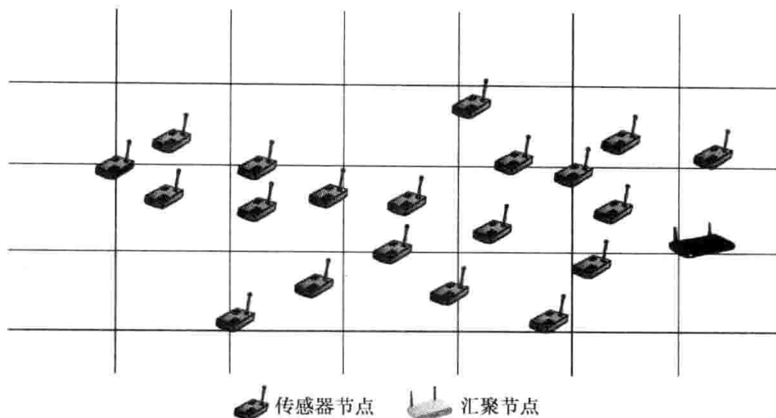


图 5.28　随机部署

降低了网络生命周期（图 5.29 中 GeRaF 的 FND 也比 CDR 要低，其原因正如图 5.26 所示的两种协议在强制路径部署下的表现一样）。因此，在随机部署的网络中，CDR 的性能表现也比 GeRaF 的性能表现要好许多，因为它可以利用有多路径可供选择节点来选择能耗最小的路径，从而延长了网络生命周期。

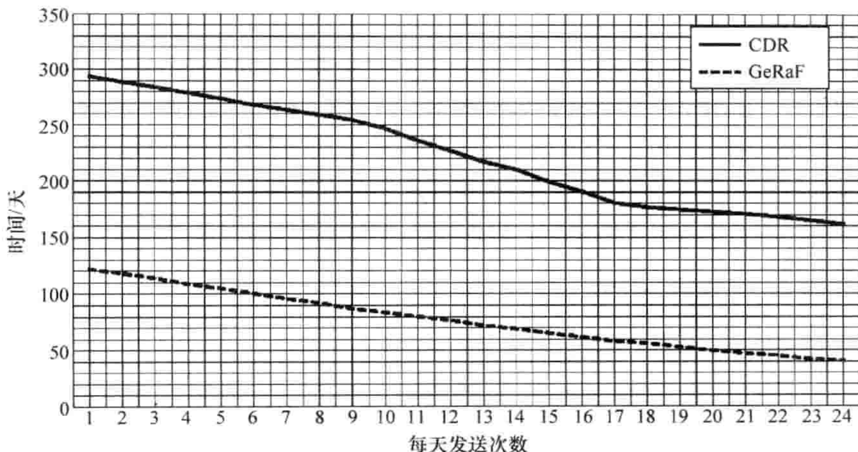


图 5.29　随机部署场景中的 FND

5.5.4　节点密度与伸缩性

前面所述的场景具有不同的配置但节点数量相同（20 个节点）。增加节点密度或节点的数目是测试协议的一个很好的方法，因为它可测试网络可扩展性。网络节点数目的增加产生的首个影响就是网络的流量会增加，从而导致拥塞的机会增加。产生的另外一个影响是可选择的路径会增加，因为增加的每一个额外的节点都可能会成为一个候选路径。因此，当网络节点的数目增加到 30 和 40 个节点时，分别对网络生命周期和 FND 进行测试。

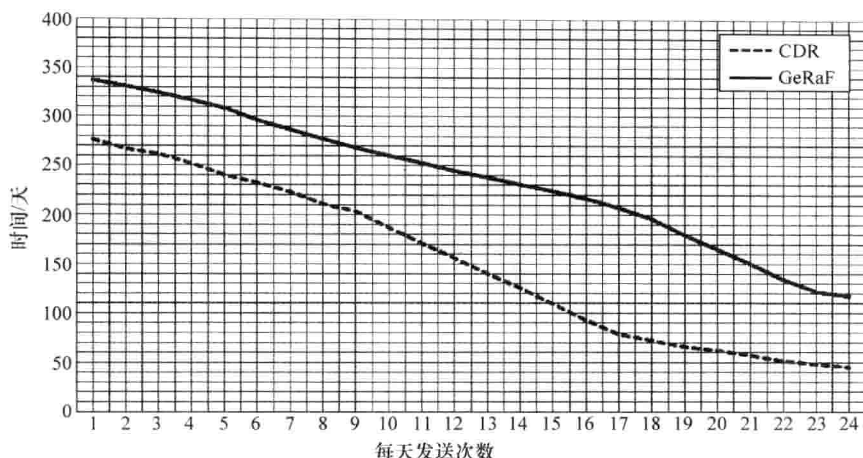


图 5.30　随机部署的网络生命周期

1. 网格部署

在首个场景中，节点部署在网格部署中，网格部署允许从源节点到汇聚节点有许多路径可供选择。

从图 5.31 ~ 图 5.34 中可以看出，CDR 的性能要优于 GeRaF：对于大型网络的网络密度增加而言，CDR 是一种鲁棒的解决方案。虽然 GeRaF 协议的网络生命周期随着节点密度增加快速缩短，但在 CDR 协议中，网络生命周期仅仅是稍微缩短。这是因为节点密度增加对两个协议的 FND 和网络生命周期两个方面的影响不同。相比而言，GeRaF 遭受的影响更大，因为更多的节点、更多的流量会造成更多的拥塞，这导致其网络生命周期严重下降。

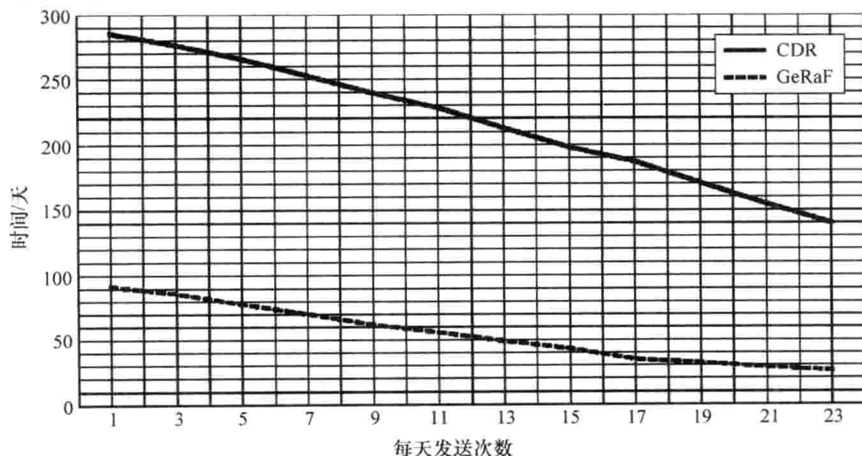


图 5.31　网格（包含 30 个节点）部署场景中的 FND

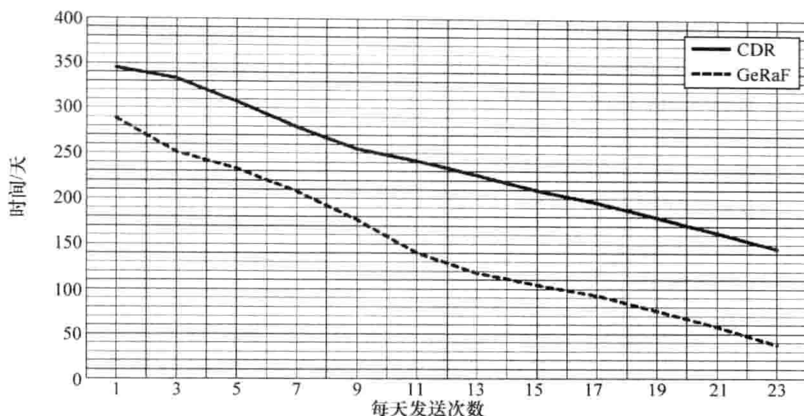


图 5.32　网格（包含 30 个节点）部署场景中的网络生命周期

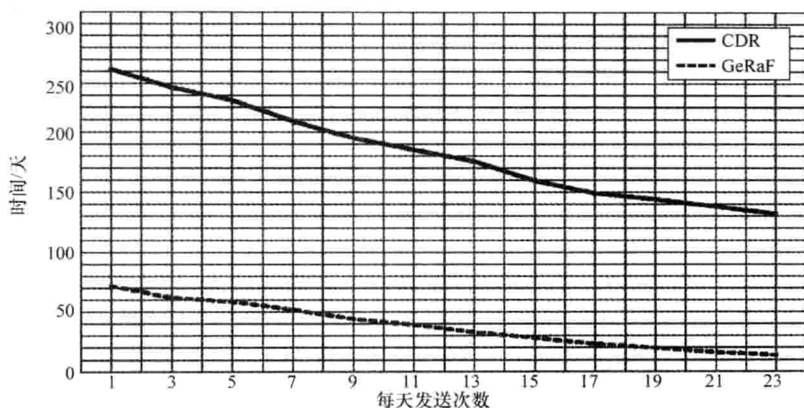


图 5.33　网格（包含 40 个节点）部署场景中的 FND

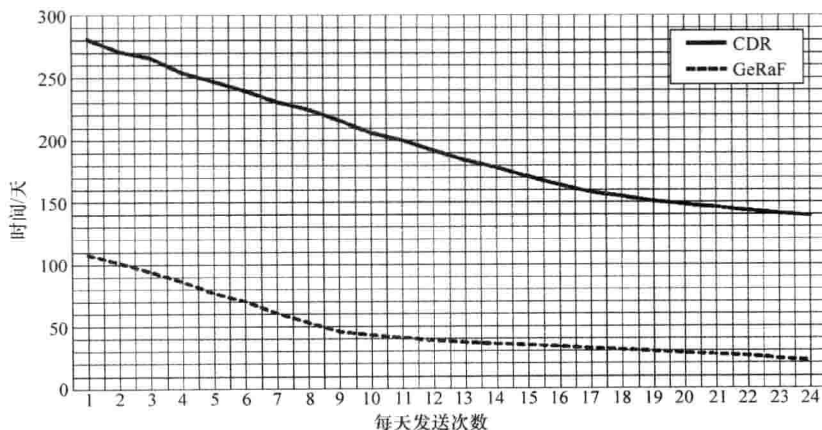


图 5.34　网格（包含 40 个节点）部署场景中的网络生命周期

另外，CDR 利用第二个方面的优点即增加路由选择，从而弥补了网络中流量和拥塞增加的缺点。将 CDR 和 GeRaF 两种协议在三种不同的节点密度下的性能表现分别置于一幅图中，如图 5.35 和图 5.36 所示。

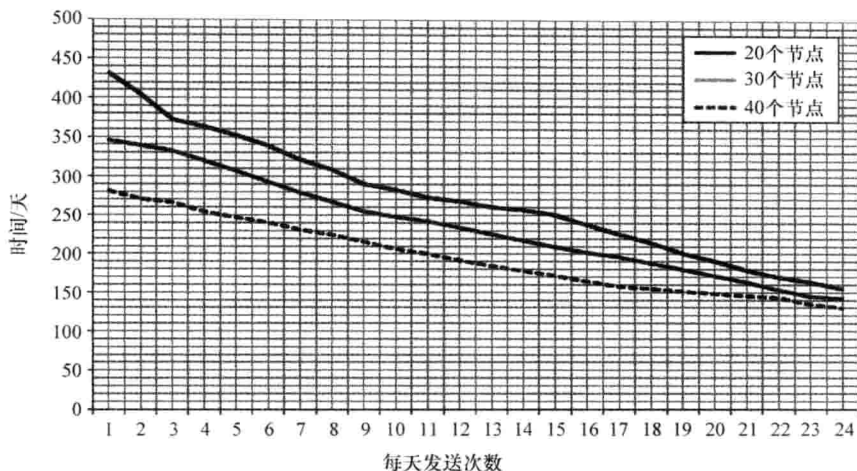


图 5.35 CDR 协议的网络生命周期可扩展性比较

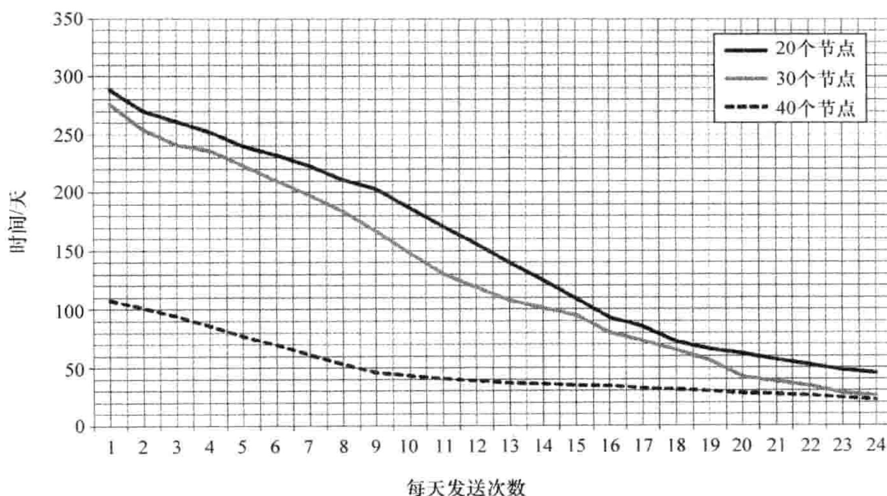


图 5.36 GeRaF 协议的网络生命周期可扩展性比较

2. 随机部署

接着，在随机部署下对两种协议的可扩展性进行测试。随机部署限制了路径数目，一些节点发送给汇聚节点时只有通过强制路径才能到达，所以区域隔离和节点孤立发生的概率较高（见图 5.37 ~ 图 5.40）。

在 30 和 40 两种不同节点密度情况下，CDR 性能表现比 GeRaF 要好得多，两种协

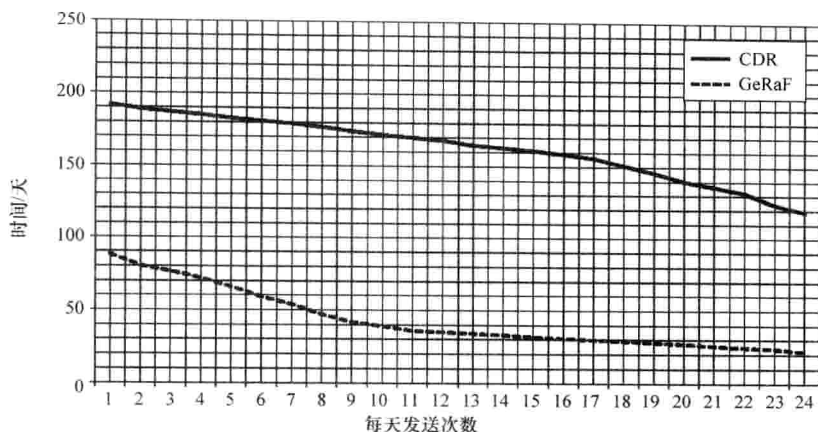


图 5.37　随机部署场景（包含 30 个节点）中的 FND

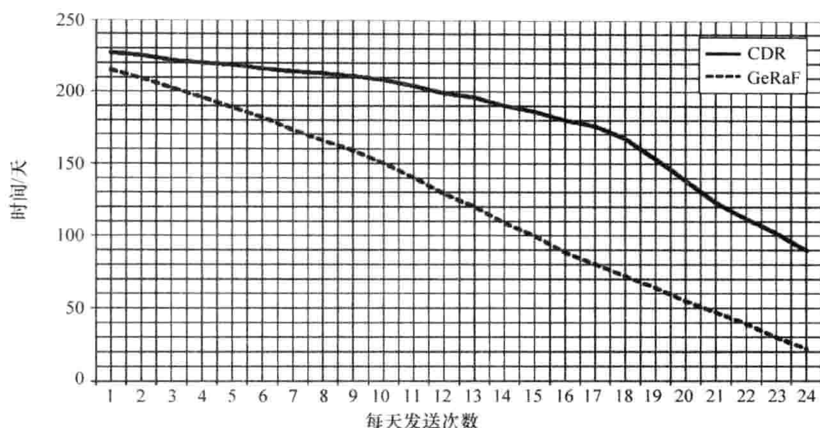


图 5.38　随机部署场景（包含 30 个节点）中的网络生命周期

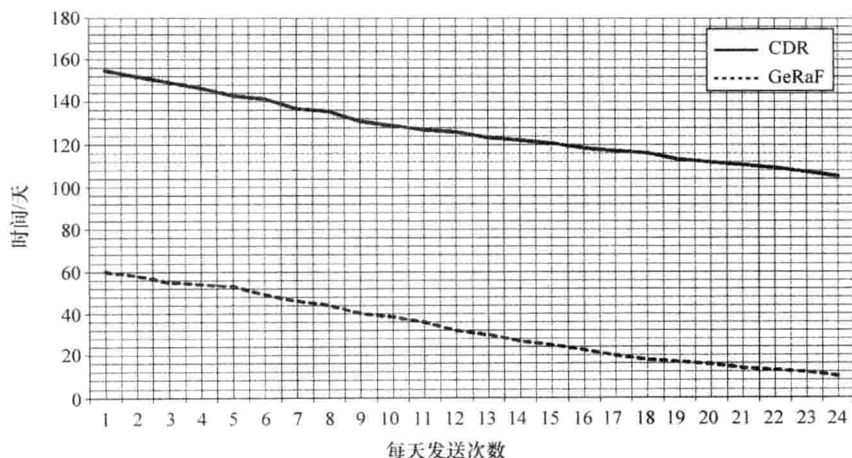


图 5.39　随机部署场景（包含 40 个节点）中的 FND

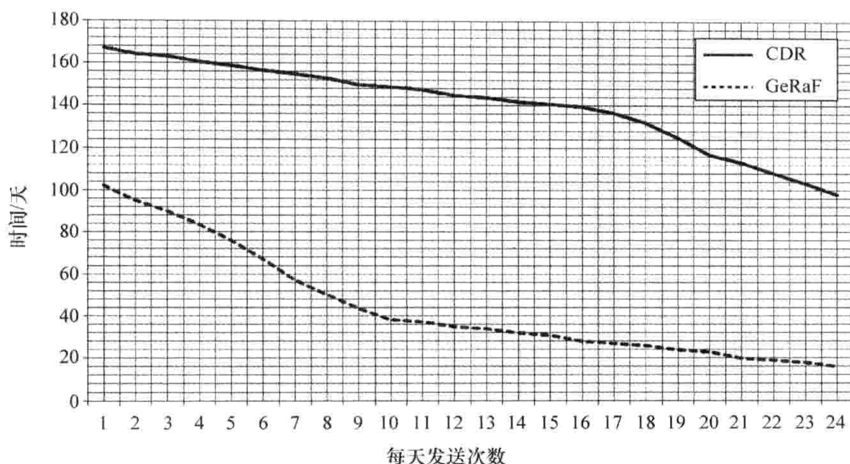


图 5.40 随机部署场景（包含 40 个节点）的网络生命周期

议在随机部署中的网络生命周期和 FND 要低于网格部署的网络生命周期和 FND，这是由于在随机部署中，存在着一些位于强制路径上的节点，或者邻居节点的数目要比随机部署少，这样就限制了可供路径选择路由的数量。

5.5.5 优化

在前面的仿真中，三个权重被分配的优化值为 $k_1=8.57$，$k_2=5.71$ 和 $k_3=5.71$，这样的权重分配侧重于能量参数。

下面所进行的仿真是与上面所分配的权重对比进行的，其权重值没有优化，k_1、k_2 和 k_3 的权重值都设为 1，所选择的场景是随机部署分布。

图 5.41 表明在每天传输数据量较低时，两种情况没有多大的差别；然而，在网络流量增加时，权重值优化的情况要优于权重未被优化的情况。这是因为当没有对能量参数给予较大的权重时，节点在失效以后仍有可能被选择为优先节点而不是避开它。当对能量和流量参数不加以强调时，可能会导致一个节点被去除，而对于其他节点来说，这是一条强制性路径。例如，一个节点会面临两种选择：一种选择是充当可行路径，另一种选择是作为其他节点的强制性路径，如果不考虑能量参数和流量参数，则节点会丧失一种周围环境的感知。另外，如果所有的权重都给予能量参数，节点将不会避免差的信道环境，由于信道原因造成数据低于信噪比（SNR）和接收功率阈值，优先节点将不会接收数据包，这将会导致数据包被重发或被丢弃，这种情况也可能会导致强制性路径的拥塞。因此，通过对权重的优化分配可以确保网络性能的提高。

5.5.6 关注信道参数

本节研究的是当信道参数被给予重点关注时（信道优化）优先节点选择问题，最佳优先节点选择函数权重被分配为：$k_1=8.89$，$k_2=6.67$ 和 $k_3 \doteq 4.44$。

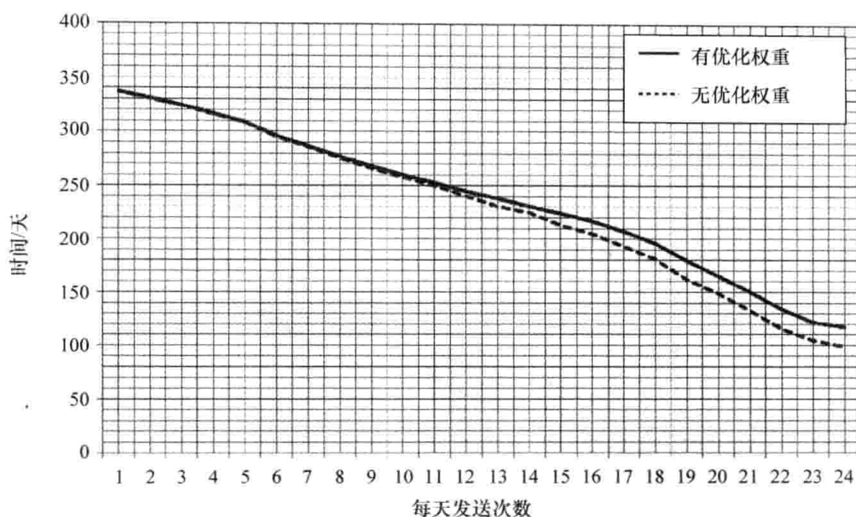


图 5.41　优化与非优化的权重比较

为显示信道优化的影响，对信道参数的权重大于能量参数的权重的场景进行仿真。在这种场景中，遮蔽和路径损耗变量被改变和增强，这样加大了信道参数的重要性，其目的是描述由于遮蔽效应而造成的严重衰落的信道。在这种情况下，测量网络生命周期和 FND 将不是主要考虑的问题，因为当信道条件极差时，数据包将被丢弃，也达不到数据的目标节点。为了测试其可靠性，可以测试丢弃的字节数。在 CDR 中需要注意的是，当一个节点不是优先节点或在收到 ACK 数据包时，它也会丢弃接收到的数据包，因此，在对丢失的数据包进行测量时，应对于由于信道质量差而被丢弃的数据包进行标记和测量。图 5.42 和图 5.43 显示了在一个网格部署中的结果。

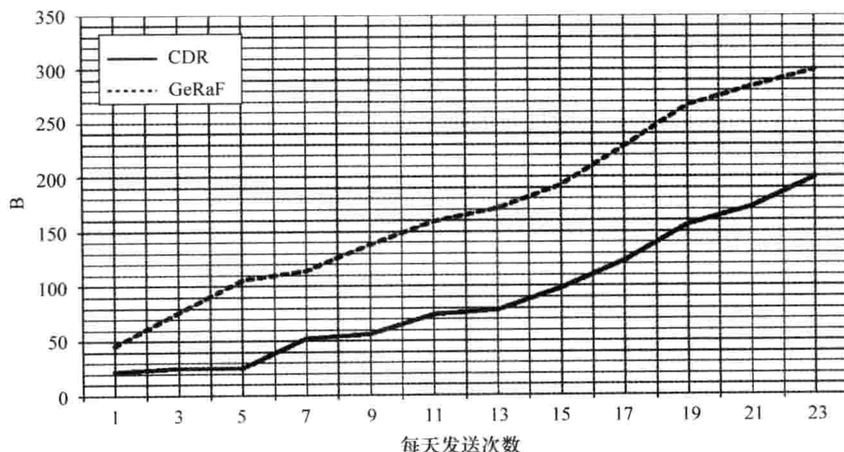


图 5.42　丢弃的字节数

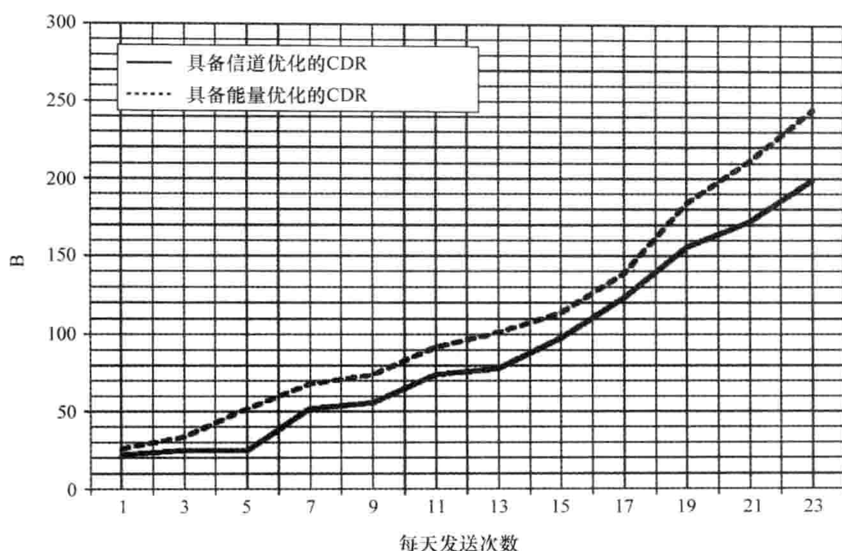


图 5.43　由于优化而丢弃的字节数

与其他协议相比，CDR 更可靠，因为在 CDR 中丢弃的字节数要比其协议丢弃的字节数要少，这是由于 CDR 选择最佳信道条件的路径，避免了遮蔽效应更高的路径，从而减少了数据包的丢失。减少丢弃的数据包的数量也会减少传输，如当传输失败时，第二个或第三个优先节点要转发此信息，将导致网络的能源消耗，从而降低了网络的生命周期。图 5.43 显示了在 CDR 中信道优化与能量优化的性能对比。由于信道质量很差，信道优化重点关注信道质量，可使节点路由远离那些遮蔽效应较大的信道，减少了这些链路上的丢包量，使得 CDR 在信道优化方面的表现要优于能量优化的表现。

1. 网格部署

下面对信道优化的 CDR、能量优化时的 CDR 以及 GeRaF 在网格中进行配置时的网络生命周期进行仿真测试，其结果如图 5.44 所示。

从图 5.44 中可以看出，信道优化时的 CDR 性能最佳。在信道质量较差的情况下，会有大量的数据包丢失或接收功率低于预定阈值而导致无法接收。因此，当数据包丢失时，CDR 会利用分集路由来确保传输可靠性和传输成功，更多的节点将发送信息（如第二和第三优先节点）。于是，当更多节点发送信息时，网络生命周期会缩短。因此，能够提高可靠性的协议同时也能延长网络生命周期，因为它降低了重传节点的数目。图 5.45 显示了 100 天后每个节点的电池电量。

从图 5.45 ~ 图 5.48 中可以明显看出，在 CDR 中，由于负载均衡，使得电池能量更为均匀地分布于网络的各个节点中。这些图证明了 CDR 的认知功能，当环境发生变化时，如在一个信道状况差且遮蔽效应明显的链路中，CDR 能够进行信道优化，其目的是从前面章节提供的能量优化角度进一步提升其性能，通过基于信道优化的优先节点的选取，节点避免了遮蔽效应明显的信道，从而降低了丢包的数量，这反过来也减少了节

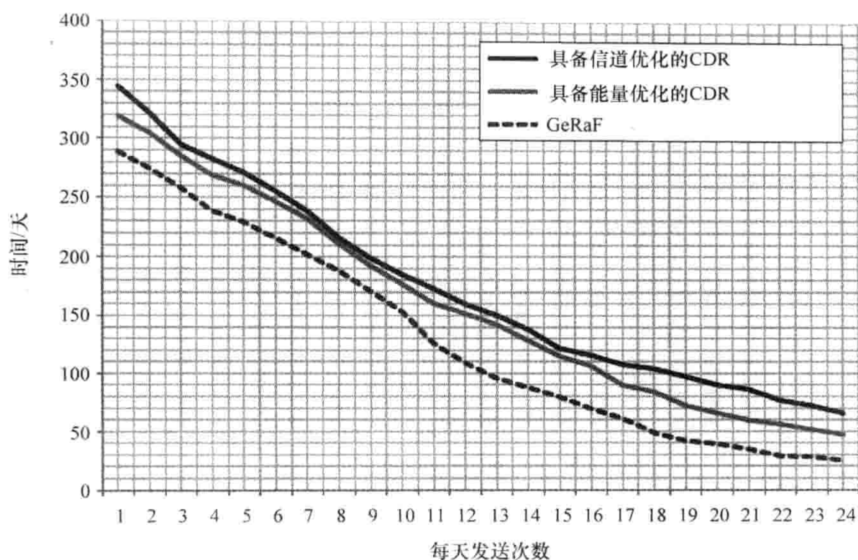


图 5.44　信道优化的网络生命周期

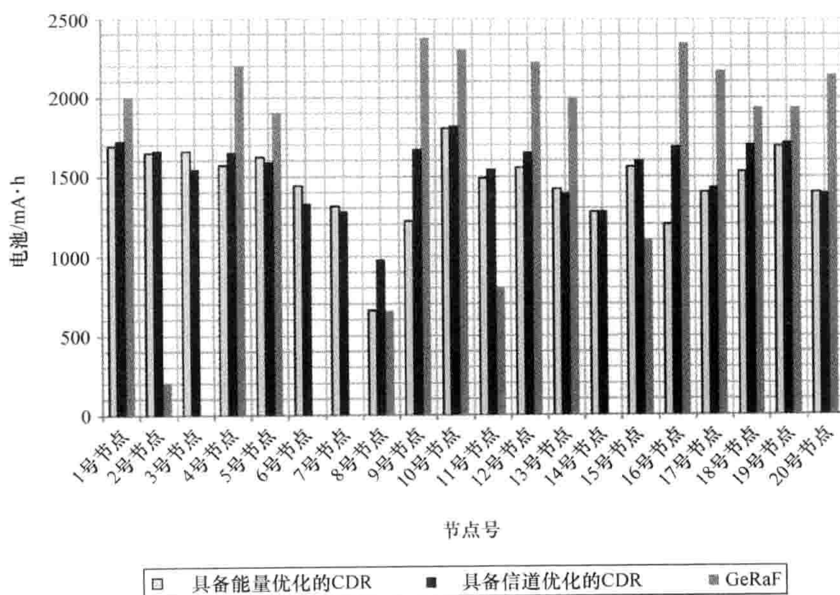


图 5.45　100 天后电池电量分布协议比较

点转发数据的数量，这不仅延长了网络生命周期，还由于协议的认知特性也增加了网络的可靠性。

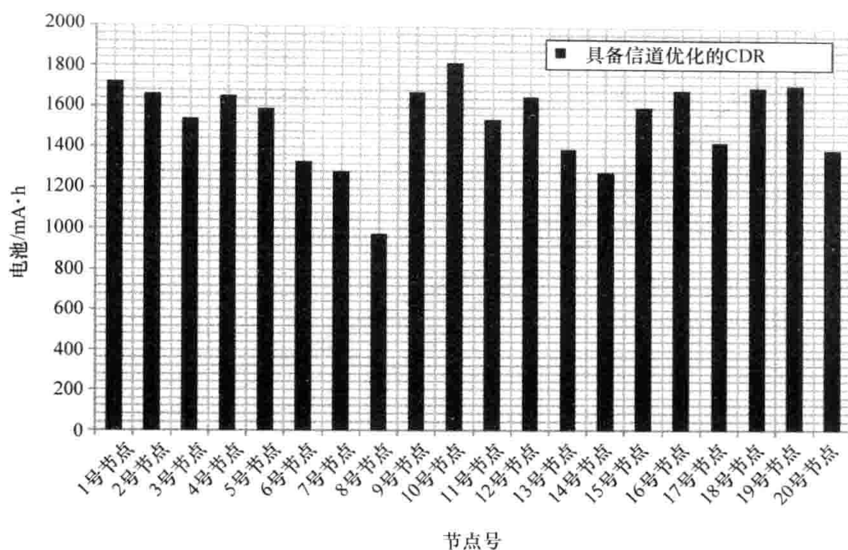


图 5.46　100 天后具备信道优化的 CDR 协议的电池电量分布

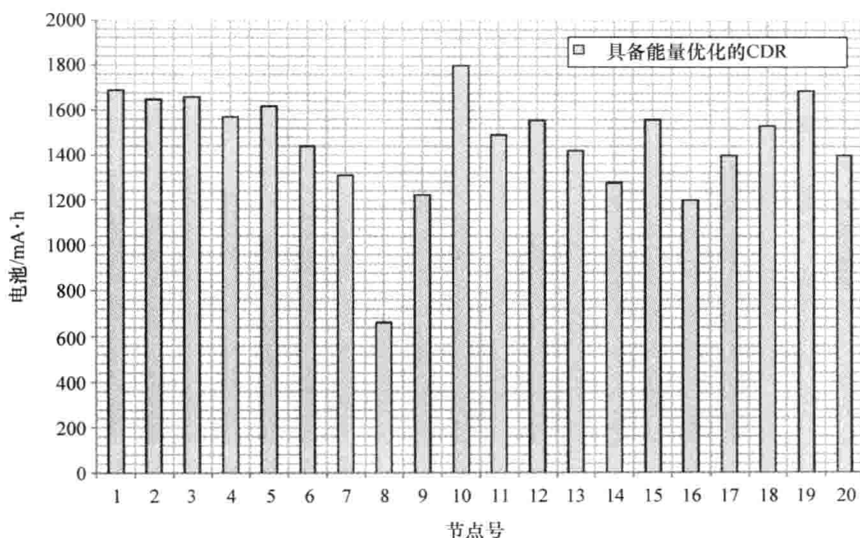


图 5.47　100 天后具备能量优化的 CDR 协议的电池电量分布

2. 强制路径部署

强制路径部署描述了节点路径选择的另一个极端。在强制路径部署中，节点被分为不同的群，每个群只能通过一个两节点“桥”进行连接，这种连接限制了路径选择，使得下一点跳只能通过两个节点进行。在强制路径部署下分别测得在采用三个协议时的网络生命周期。

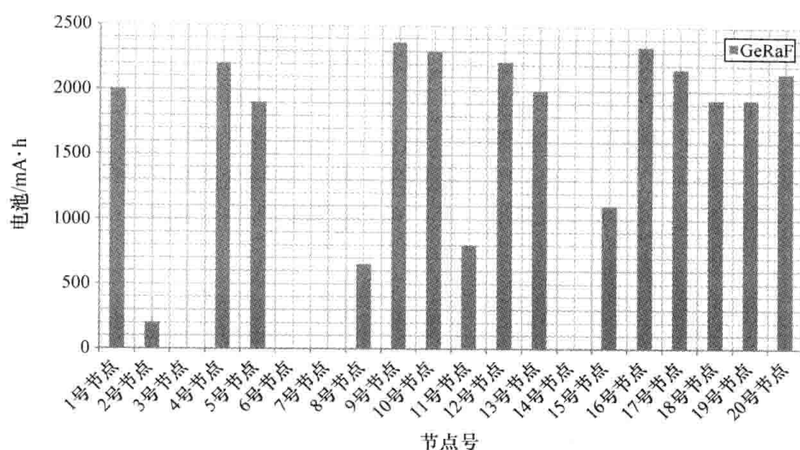


图 5.48 100 天后 GeRaF 协议电池消耗的电量

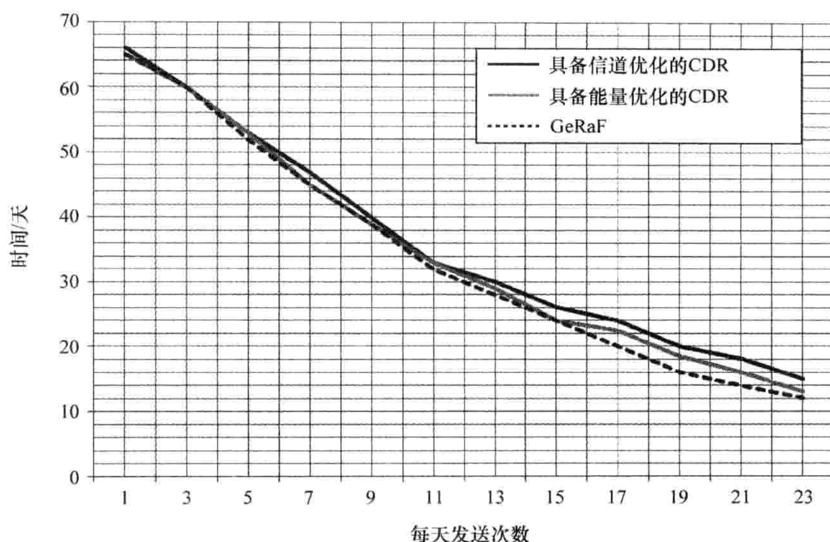


图 5.49 强制路径模式下的网络生命周期

图 5.49 显示了与图 5.27 所示所示的不同特性。在图 5.27 中，对于两个协议的网络生命周期非常相似；然而在图 5.49 所示中，每个协议之间的网络生命周期都有差异。在一个信道状况较差的场景中，大量的数据包被丢弃，导致了更多的重传，反过来也降低了网络的生命周期。在图 5.27 所示的场景中，网络的生命周期取决于协议所占用的路径数；而在图 5.49 所示的场景中，网络生命周期则依赖于协议的可靠性，协议的可靠性反过来也影响网络生命周期。这就解释了为什么基于信道优化的 CDR 具有更优的性能，而 GeRaF 具有最低的网络生命周期。

3. 随机部署

随机部署结合了网格部署和强制路径部署两种配置的特性，在这种配置中，一些节点有许多不同的可用路径到达目标节点，而其他的节点则可能会处于比较偏远且孤立的位置，只能通过一个强制路径来传送到汇聚节点。随机部署的网络生命周期预计要低于网格部署的网络生命周期，这是由于在随机部署中，网络分隔的概率更高，从而使得一些节点会失效得更快。在随机部署中，对三种协议网络生命周期进行测量，其结果如图5.50所示。

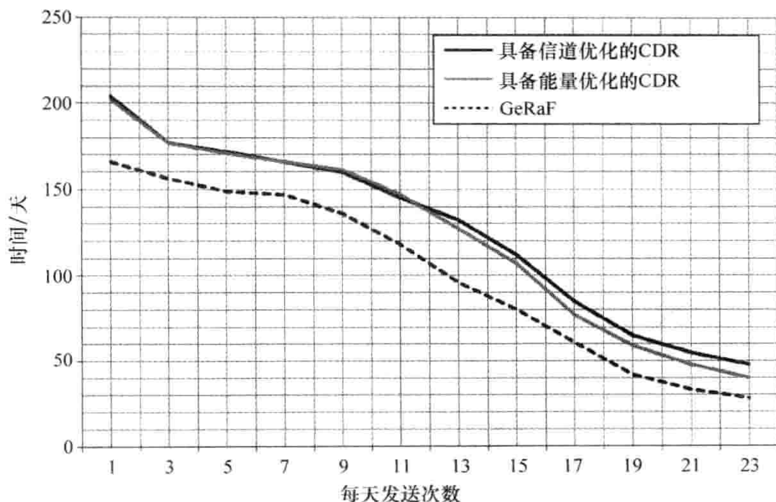


图5.50 随机部署场景中的网络生命周期

图5.50显示了基于信道优化的CDR要略好于基于能量优化的CDR，它们都要比GeRaF好。这是由于丢弃数据包的增加会导致更多的重传，从而增加了能耗。网络生命周期依赖于协议的可靠性，这就是为什么基于信道优化的CDR性能最佳而GeRaF则具有最低网络生命周期的原因。

前面三个场景显示了CDR的认知功能方面，当环境发生变化时，如在一个信道质量差且遮蔽效应明显的链路中，CDR能够进行信道优化，其目的是通过前面章节所述的能量优化以进一步提高其性能。通过基于信道优化的优先节点的选取，节点避免了遮蔽效应明显的信道，从而降低了丢包的数量，这反过来也减少了节点转发数据的数量，这不仅延长了网络生命周期，还由于协议的认知特性也增加了网络的可靠性。这显示了节点具备能够智能地适应网络变化的能力，可以将CDR协议作为一种认知协议。

5.6 结论

本章提出了一种主要用于无线传感器网络的认知分集路由协议，其主要目的是延长网络生命周期。由于CDR能够通过感知、推理和知识汇聚来灵活适应网络环境，因此，

它是一种认知协议。该协议保证了网络节点对网络状态进行探测并共享信息，其目的是在网络节点进行优化决策前的了解和推理。

通过利用能量、信道和流量参数这些要素，节点就可以了解可能会影响网络能量效率的所有方面，由此，可以灵活地适应网络条件的动态变化以达成网络端到端的目标。分集路由技术可用来提高网络可靠性和减少不必要的重传次数。仿真和性能评估表明，CDR 通过保证负载均衡使得能耗分布在网络中，使得其优于另一种流行的协议。

负载均衡是由于协议支持节点沿着大量不同的路径来实现路由功能而出现的。网络节点在传递的每一步都选择最佳的下一跳，保证了能耗平均分布在网络中，从而降低了网络分隔、节点隔离、网络拥塞和瓶颈，这样将会带来额外的端到端的时延；然而，这样所造成的时延在可接受的范围内。通过认知功能，节点能够适应网络的变化，无论这种变化是发生在信道较差的情形中，还是发生在流量拥塞区域。认知功能支持协议的鲁棒性和可扩展性；当网络节点密度较高时，认知功能的优势显露无遗，因为它能够增加可用路径的数量。

CDR 也提出了如何利用分集路由技术提高吞吐量和可靠性，它提供了比 GeRaF 更多的自由度。CDR 在各种类型的网络配置如在网格和随机部署中的性能表现都比较好。在网格部署中，CDR 能利用网格部署中可用路径数量大的特点；在随机部署中，协议通过路由功能使流量远离网络的“桥接节点”（强制路径上的节点），来保护强制路径上的节点或面临隔离危险的节点，从而延长网络生命周期。

参考文献

1. Akan, O.B., Karli, O., and Ergul, O. (2009, July–August). Cognitive radio sensor networks. *IEEE Network* 23(4), 34–40.
2. Al-Karaki, J.N., and Kamal, A.E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 6–28.
3. Al-Turjman, F.M., Hassanein, H.S., and Ibnkahla, M.A. (2009). Connectivity optimization with realistic lifetime constraints for node placement in environmental monitoring. *IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, 2009. LCN 2009.* Zurich.
4. Boonma, P., and Suzuki, J. (2007). Evolutionary constraint-based multiobjective adaptation for self-organizing wireless sensor networks. *2nd Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, 2007. Bionetics 2007*, Budapest, pp. 111–119.
5. El Mougy, A., Bdira, E., and Ibnkahla, M. (2010). Throughput optimization of a power-aware MAC for WLANs in correlated shadowing environments. *25th Biennial Symposium on Communications (QBSC), 2010*, Kingston, Ontario, pp. 10–13.
6. El Mougy, A., El-Jabi, Z.H., Ibnkahla, M., and Bdira, E. (2010). Cognitive approaches to routing in wireless sensor networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, 2010. GLOBECOM 2010*, Miami, FL.
7. El-Jabi, Z. (2010). *Cognitive Diversity Routing in Wireless Sensor Networks*, MSc. thesis, Queen's University, Canada.
8. Felemban, E., Lee, C.-G., and Ekici, E. (2006, June). MMSPEED: Multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeline in wireless sensor net-

works. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5(6), 738–754.
9. Fortuna, C., and Mohorcic, M. (2009, June). Trends in the development of communication networks: Cognitive networks. *Computer Networks* 53(9), 1354–1376.
10. Frey, H., Ruhrup, S., and Stojmenovic, I. (2009). Routing in wireless sensor networks. In *Guide to Wireless Sensor Networks*, edited by S.C. Misra, I. Woungang, and S. Misra, 81–111. Paderborn, Germany: Springer London.
11. Griva, I., Nash, S.G., and Sofer, A. (2009). *Linear and Nonlinear Optimization*, 2nd ed. Fairfax, Va.: Society for Industrial and Applied Mathematics.
12. Ibnkahla, M. (2010). *Versatile Wireless Sensor Network for Environment Monitoring Applications with High Modularity*. Technical Report, Queen's Wireless Communications and Signal Processing Laboratory, Kingston, Ont.
13. Kim, B., and Kim, I. (2006, January). Energy aware routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Computer Science and Network Security* 6(1).
14. Kuruvila, J., Nayak, A., and Stojmenovic, I. (2006, July). Progress and location based localized power aware routing for ad hoc and sensor wireless networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2(2), 147–159.
15. Lenders, V., and Baumann, R. (2008). Link-diversity routing: A robust routing paradigm for mobile ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008*, Las Vegas, pp. 2585–2590.
16. Mansouri, V., Ghiassi-Farrokhfal, Y., Nia-Avval, M., and Khalaj, B. (2005). Using a diversity scheme to reduce energy consumption in wireless sensor networks. *2nd International Conference on Broadband Networks, 2005. BroadNets 2005*, Boston, pp. 940–943.
17. Mizanian, K., Yousefi, H., and Jahangir, A.H. (2009). Modeling and evaluating reliable real-time degree in multi-hop wireless sensor networks. *Sarnoff Symposium, 2009. SARNOFF '09. IEEE*, Princeton, N.J., pp. 1–6.
18. Molisch, A.F., Greenstein, L.J., and Shafi, M. (2009, May). Propagation issues for cognitive radio. *Proceedings of the IEEE* 97(5), 787–804.
19. Niezen, G., Hancke, G.P., Rudas, I.J., and Horvath, L. (2007). Comparing wireless sensor network routing protocols. *AFRICON 2007*, Windhoek, pp. 1–7.
20. Oteafy, S., AboElFotoh, H.M., and Hassanein, H.S. (2009). Dynamic election-based sensing and routing in wireless sensor networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009*, Honolulu, Hawaii, pp. 1–6.
21. Ozgovde, A., and Ersoy, C. (2007). WCOT: A realistic lifetime metric for the performance evaluation of wireless sensor networks. *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007*, Athens, pp. 1–5.
22. Rappaport, T.S. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
23. Reznik, L., and Von Pless, G. (2008). Neural networks for cognitive sensor networks. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Hong Kong, pp. 1235–1241.
24. Rossi, M., Bui, N., and Zorzi, M. (2009, March). Cost and collision minimizing forwarding schemes for wireless sensor networks: Design, analysis and experimental validation. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 8(3), 322–337.
25. Safwat, A., Hassanein, H., and Mouftah, H. (2001). Energy-efficient infrastructure formation in MANETs. *26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2001. Proceedings. LCN 2001*, Tampa, Fla., pp. 542–549.
26. Shah, R.C., and Rabaey, J.M. (2002). Energy aware routing for low energy ad hoc

sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WC-NC2002*, Orlando, pp. 350–355.

27. Shariatpanahi, P., and Aarabi, H. (2007). On reliable routing in wireless networks with diversity. *IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2007. WOCN '07*, Singapore, pp. 1–5.
28. Shu, H., and Liang, Q. (2005). Wireless sensor network lifetime analysis using interval type-2 fuzzy logic systems. *The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05*, Reno, Nev., pp. 19–24.
29. Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., and Conti, A. (2008). *Wireless Sensor and Actuator Networks; Technologies, Analysis and Design*. Great Britain: Elsevier.
30. Vijay, G., Bdira, E., and Ibnkahla, M. (2010). Cognitive approaches in wireless sensor networks: A survey. *25th Biennial Symposium on Communications (QBSC)*, Kingston, Ont., pp. 177–180.
31. Wang, G., Wang, T., Jia, W., Guo, M., Chen, H.-H., and Guizani, M. (2007). Local update-based routing protocol in wireless sensor networks with mobile sinks. *IEEE International Conference on Communications, 2007. ICC '07*, Glasgow, pp. 3094–3099.
32. Wang, Q., and Yang, W. (2007). Energy consumption model for power management in wireless sensor networks. *4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON '07*, San Diego, Calif., pp. 142–151.

第6章　基于加权认知图的认知功能

6.1　概述

可以使用诸多工具来设计认知网络，其中包括神经网络、遗传算法、博弈论和专家系统[1]。然而，一般来讲，熟悉这些工具需要很长的学习时间，或随着考虑变量的增加其复杂程度显著增加。

本章中，将加权认知图（Weighted Cognitive Map，WCM）视为为系统冲突处理过程提供参数化表示的一种工具。参考文献［13］和［14］首次提出了将WCM作为实现无线传感器网络认知功能的一种有效工具。在加权认知图中，每个过程、环境变量或端到端目标都可以用系统中的某个概念来简单表示，图的边与存在因果关系的概念有关（对WCM的概述在6.3节中给出）。这意味着加权认知图处理端到端的目标或约束条件作为系统中简单的概念来进行处理，这大大降低了复杂度。此外，系统间的相互作用是通过简单的数学运算来表示，从而避免了由于优化造成的处理时间长的问题。同时，加权认知图也可以考虑网络内部的相互冲突，在考虑网络内部相互冲突时，它仅需要明确这些处理过程之间关系的信息。

尽管在参考文献［2］中用WCM设计认知节点，但这些节点都是独立运行且设计中没有考虑与其他节点的相互作用。此外，参考文献［2］并不是主要针对无线传感器网络（WSN）的需求而进行设计的。在考虑诸多约束条件下，尝试使用加权认知图来设计无线传感器网络的认知引擎，可以监控网络互动情况并实现端到端的目标。以这种方式使用加权认知图可以使网络设计者不受跨层设计的局限，提高了网络的灵活性和适应性。

本章的其余部分安排如下：6.2节回顾了最近的一些相关研究成果；6.3节对加权认知图进行了简单的介绍；6.4节阐述了加权认知图工具的详细信息；6.5节提供了可显示加权认知图工具的能力的仿真结果，最后6.6节得出了一些结论。

6.2　相关工作

一些领域已经运用在无线传感器网络设计中：覆盖、连通、路由和拓扑管理等。例如，参考文献［3］在考虑分簇架构中路由和网络覆盖的约束条件下，提出采用网络管理系统试图来提高能效，延长网络生命周期。由此演绎出一个优化问题，标记为OPT－ALL－RCC，它能够在保证网络覆盖和连通情况下，最大限度地减少能源消耗并实现负载均衡。研究结果表明，OPT－ALL－RCC是NP完全问题，并提出了一种名为TABU－

RCC 的启发式算法，在高性能和处理时间之间实现了折中。

参考文献［4］中提出的网络管理系统即为大家所知的节能 m - 覆盖范围 n - 连通性路由（EECCR）。它考虑在多重覆盖和连通约束条件下的路由问题。EECCR 分为两个主要阶段。第一阶段建立路由路径，将网络区分相互独立的时序集，通过转换时序集可以保证 m - 覆盖范围集，建立路由路径，实现 n - 连通性；EECCR 第二阶段是数据传输阶段，在设置的路由路径中转发数据到汇聚节点。参考文献［5］提出了一个被称为拓扑感知资源适应（TARA）的框架，其主要目的是缓解无线传感器网络中的拥塞，它的主要思想是在拥塞期间激活更大数量的节点，从而增加网络资源并减少拥塞。网络拓扑和流量模式可以使启发式算法检测到拥塞的节点，激活合适的网络节点，并发现可替代的路由路径，使得传播的数据包远离拥塞区域。TARA 具备能够在动态环境中有效操作的优势。

尽管对无线传感器网络的研究非常积极，但大多数的研究只考虑具体问题，且在影响网络效率的多个方面的研究还普遍存在着研究不够的问题。优化问题或启发式算法不容易扩展到考虑多个目标和约束。认知网络试图通过前面提到的这些处理过程解决这些问题。

在参考文献［1］中，Thomas 等提出了一种认知框架，该框架主要分为三层。最高层是需求层，它指定网络端到端的目标；第二层是进程层，它包含了所有的认知元素和算法，并生成决策来实现网络的目标；第三层是网络软件适应层，该层执行高层的决策并收集认知框架网络运行所必需的信息。该框架不指定实现上述层的任何特定工具，而是根据用户需求来确定采用何种工具。

认知网络中的其他工作包括知识平面（KP）[6]，知识平面将收集知识，目的是使网络能够适应不同的环境条件，并检测和防止不同的问题。已应用于认知网络设计工具在前面已经提到过，需要指出的是，设计一个无线认知网络不同于其他网络如 ad hoc 网络，在 ad hoc 网络中，节点可以运行不同的应用程序并允许节点具有一定的独立性，而认知节点可以完全独立运行。另外，无线传感器网络中，节点通常运行同一应用程序并具有相同的目标。因此，如果认知是可以实现的，无线传感器网络中整个网络内节点之间的相互作用是非常重要的。

6.3　加权认知图的基本原理

WCM（也被称为模糊认知图）是一个用来通过系统间因果关系来表示动态系统的图形化模型[7]。WCM 中的节点称为概念，它代表了系统模拟的一个特定的进程或事件。WCM 的边连接那些与其有关系的概念，每个概念 C_i 由一个数值 A_i 来表示它的值，该值表示了概念在实际系统中活动的水平。概念的取值可以在区间［0，1］或［-1，1］。如果取值范围在区间［0，1］，一个概念可以处于非活动状态（$A_i = 0$）或处于不同层次的活动状态（$A_i = 1$ 意味着处于完全活动状态）。如果允许的区间为［-1，1］，然后概念数量也可以减少。边的权重可以采取区间［-1，1］内的任何值，负的边权重意

味着负作用，正的边权重意味着正作用，零边权重意味着概念之间没有关系。加权认知图（WCM）可以是定性的或定量的，定性的 WCM 只代表概念之间是否具有作用，而定量的 WCM 则可以代表概念之间具有不同作用级别。一个加权认知图（WCM）的主要优点在于它的推理能力。例如，图 6.1 显示的是用 WCM 来描绘一个无线节点的处理进程。

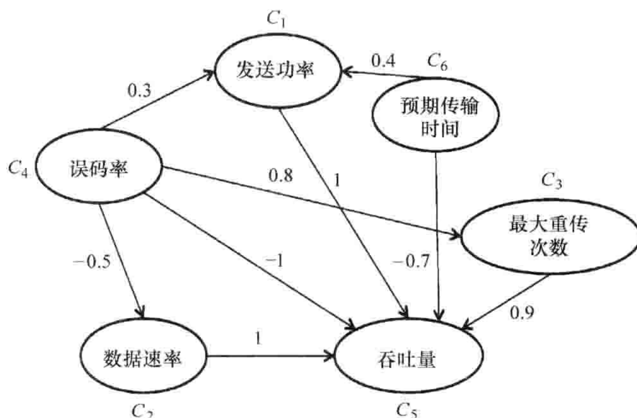


图 6.1 无线节点的加权认知图表示进程

图 6.1 的 WCM 模拟了影响无线节点的六个进程之间的关系：发送功率、数据速率、数据包被丢弃之前所允许的最大重传数目、误码率（BER）、吞吐量和预计的传输时间（ETT）。它所显示的边权重代表了各个元素间关系的强度。该 WCM 可以用矩阵形式表示为

$$
\boldsymbol{W}=\begin{array}{c|cccccc}
 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\
\hline
C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
C_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0 \\
C_4 & 0.3 & -0.5 & 0.8 & 0 & -1 & 0 \\
C_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
C_6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & -0.7 & 0
\end{array} \tag{6.1}
$$

对于一个具有 n 个概念的 WCM 而言，其在 t 时刻的状态可表示为

$$At = A_1 tA_2 tA_3 t\cdots A_n t' \tag{6.2}$$

根据加权认知图的推理能力，其在 $t+1$ 时刻的状态是通过对矢量积 $WA(t)$ 的每个元素进行一个阈值函数 $f(x)$ 运算而得到的，其状态为

$$A(t+1)=f(WA(t)) \tag{6.3}$$

通常，函数 $f(x)$ 为下面三个函数之一：

（1）二元函数

$$f(x)=\begin{cases}1, x>0\\0, x\leqslant 0\end{cases} \tag{6.4}$$

在这里，概念的活动水平是0或1，在这种情况下，WCM被称为一个简单的WCM。

（2）三元函数

$$f(x)=\begin{cases}1, x>0\\0, x=0\\-1, x<0\end{cases} \tag{6.5}$$

在这种情况下，概念可以从集合{-1，0，1}中取值，此时的WCM称为三价WCM。

（3）双曲函数

$$f(x)=\tanh(x) \tag{6.6}$$

在这里，概念的活动水平可以从区间[-1，1]内取任何值，此时WCM被称为一个连续的WCM。

当一个特定的概念被触发时，WCM的推理进程开始初始化，已经触发的概念根据W影响其他概念。如果系统自由地通过一系列矩阵乘法进程的相互作用后，它最终将达到下面的三个条件之一[8]：

1）均衡，进行进一步的乘法运算且不改变WCM的状态；

2）极限环，该系统经过一定次数乘法后又返回到一个特定的状态；

3）混沌状态，每次新的运算都产生一个新的结果。

简单和三价的WCM具有有限数量的状态（对于简单的WCM而言，有2^n个状态，对于三价WCM而言，有3^n个状态），因此，它们只能达到平衡状态或极限环状态。连续的WCM代表着颗粒度更细的系统，但如果设计不精细，可能会面临处于混沌状态的危险。

相对于贝叶斯网络和神经网络，加权认知图具有显著优点，它允许反馈回路，而这在贝叶斯网络中是不允许的。加权认知图的概念也代表着实际系统的事件或进程，这在神经网络中是不可用的，在神经网络中可以将其看作一个黑匣子，通过训练黑匣子可以对特定系统进行建模，但可能无法忠实再现系统的某些特征。简单的推理特性也使加权认知图对那些复杂程度要求较低的系统而言特别具有吸引力，如对无线传感器网络。这些优点都使加权认知图（WCM）作为一个简单且有效的工具可以来准确地描绘任何动态系统。

值得注意的是，加权认知图也有一些缺点[9]，它依赖专家知识来设计系统，这个缺点可能是具有挑战性的，尤其是在定量的加权认知图中。同时，人们尚未围绕如何从网络全局视图的角度构建加权认知图展开研究，在这种视图中，可能存在多个加权认知图，且这些图必须协同工作以实现特定的端到端目标。

6.4 设计WCM完成无线传感器网络中的认知功能

WCM（加权认知图）的设计要考虑到上述挑战。为了消除对加权认知图进行大面

积训练的需求，使用加权认知图制定一个用参数化表示的 WSN[13-14]。这种表示既不是完全定量的也不是定性的，可能更适合被称为智能决策支持系统，该系统可以做出定性决策来确定不同系统参数的特定值。因此，在保持定性 WCM 简单的同时也成功利用了定量 WCM 的优势，并且消除了对加权认知图进行大面积训练的需求。

为了构建一个分布式系统，该系统可支持 WCM 通过相互作用一起工作来实现网络端到端的目标，首先考虑分簇无线传感器网络的层次结构。在设计中，假设汇聚节点和簇头（CH）是智能节点，WCM 将在这些节点中实现，而传感器节点是没有智能功能的正常节点，它随机分布在所覆盖的区域。簇头做出的决定将由簇中正常的传感器节点来实现。由于汇聚节点是网络中有集中视图的唯一节点，它将被用于监测诸如网络连通性和覆盖性的全局概念。因此，所有的概念都在簇头中实现，而汇聚节点从整个网络的角度考虑确保那些需要全面监测的概念。图 6.2 所示为系统结构。

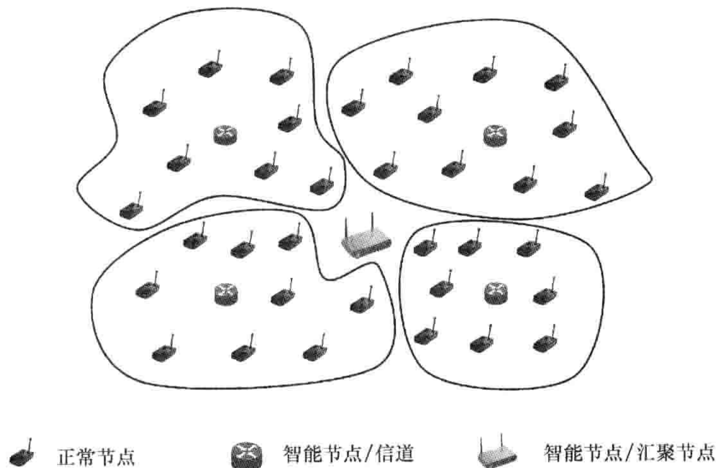


图 6.2　系统结构

如图 6.2 所示，汇聚节点位于覆盖地区的中心位置，而簇头分布在关键的地理位置，这样使得每个簇头管理的普通传感器节点的数量相当，传感器节点被部署在整个覆盖区域。每个节点都与负责监测其集群的簇头相关联。假定网络节点是同步的，被周期性地唤醒，网络节点可感触所需的属性，并将测量结果传送到汇聚节点，接着返回到休眠模式。节点在这一周期中唤醒的时间段称为占空比。

不失一般性，WCM 将考虑发送功率、数据速率、占空比修正、覆盖和连通性、拥塞和路由。我们定义 WCM 端到端的目标考虑能耗和负载均衡，之所以选择这些进程，是因为它们对系统性能有着显著的影响。然而，需要强调的是，这里的 WCM 系统并不局限于这些进程，其他网络设计者可以选择其他的进程以适合自身的需求。在这里，选择能耗和负载均衡的目的是要说明 WCM 的功能、系统如何处理、端到端的目标和可以转化为系统概念的变量。

接下来的内容里，针对一系列进程设计了三个 WCM，并在实现端到端目标时将这

三个 WCM 结合起来[13-14]。

6.4.1　设计针对发送功率、数据速率和占空比适应率的 WCM

本节中，WCM 根据发送功率、数据速率和占空比的适应要素进行设计，以提高能量效率、吞吐量、链路的可靠性，并保证节点间的公平性。在说明如何针对这些进程设计一个 WCM 之前，首先描述一下在 WCM 运用的协议。

第 3 章提出了一个协议，该协议可根据数据速率使用情况来适应工作周期（例如，见参考文献 [12]）。其主要思想是：当节点发现信道质量较好时，节点以更高的数据速率传输，从而完成所要传输的任务会更快，进行睡眠的状态也更迅速，其周期也更长[10]，这样会节省很多能量。

例如，图 6.3 中，其中 P_{Tx}是主动传输期间所消耗的能量，以瓦特数表示；P_{idle}是空闲期间所消耗的能量；T_1 为空闲时间的长度；P_{sleep}是休眠期间所消耗的能量；T_{packet}是整个周期持续的时间。如图 6.3 所示，当利用数据率低（即符号持续时间比较大，如图 6.3a 所示）时，传输所需要的时间比与高数据速率的情况下（即在符号持续时间比较小，如图 6.3b 所示）更长，因此，在图 6.3b 中自适应睡眠时间较长，也更节能。

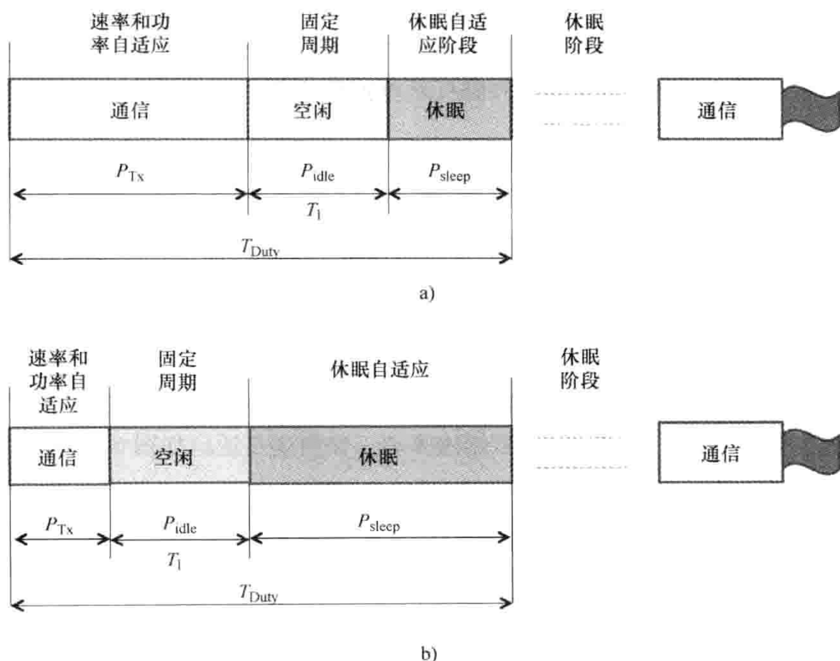


图 6.3　低数据速率时的工作周期与高数据速率时的工作周期

本章使用此协议并将其扩展至用 WCM 工具来实现它。

为设计一个针对发送功率、数据速率和工作周期自适应的 WCM，首先要确定可用来触发 WCM 采取行动的环境变量。在此，选取的环境变量为丢包率（PLR）和预期传

输时间（ETT）。选取 PLR 主要是因为它能说明信道质量和干扰的程度，可为无线链路质量提供明确的指示。ETT 是成功发送一个数据包的预期时间，它说明了链路间的干扰、需要成功发送一个数据包重传的次数和用于干扰链路的数据速率。因此，ETT 可以用来提高吞吐量并保证干扰链路间的公平。例如，当一个链路的 ETT 要明显大于另一个链路的 ETT 时，这意味着节点无法公平地接入无线媒体。通过采取措施保持干扰链路 ETT 处于相近的状态，这样就实现了公平。

一旦有一个环境变量发生明显变化，WCM 将被触发采取行动，采取的行动将适应发送功率、数据速率，或同时适应两个，适应数据速率实际上也是适应工作周期。特别地，当数据速率增加时，工作周期减小，反之亦然。不管选择的是适应发送功率还是适应数据速率都会造成更低的能耗，这也是无线传感器网络的一个主要目标。一个节点在工作循环期间的能耗可表示为

$$E = P_{\text{Tx}}\frac{L}{R} + P_{\text{idle}}T_1 + P_{\text{sleep}}\left(T_{\text{packet}} - T_1 - \frac{L}{R}\right) \tag{6.7}$$

式中 L——数据包长度；

R——数据速率。

其余的参数定义如图 6.3 所示。当需要选择是否对发送功率或适应数据速率进行修正时，只需根据式（6.7）对这种修正得到的能耗进行对比。例如，当 PLR 超过已知的域值时，WCM 需要对增加发送功率和降低数据速率进行对比，从方程（6.7）中去除常数后，这种比较可以表示为

$$\frac{P_{\text{Tx-Old}}L}{R_{\text{New}}} - P_{\text{sleep}}\frac{L}{R_{\text{New}}} \geqslant \frac{P_{\text{Tx-New}}L}{R_{\text{Old}}} - P_{\text{sleep}}\frac{L}{R_{\text{Old}}} \tag{6.8}$$

式中 $P_{\text{Tx-Old}}$，R_{Old}——在适应前发送功率和数据速率的值；

$P_{\text{Tx-New}}$——发送功率增加后的值；

R_{New}——数据速率降低后的值。

如果方程（6.8）的值是“真”，意味着降低数据速率产生的能耗将会比提高发送功率产生的能耗大，这样，将会提高发送功率。如果方程（6.8）的值是“假”，则会降低数据速率。WCM 的发送功率、数据速率和工作周期自适应如图 6.4 所示，其概念标记为 $C_1 \sim C_5$。

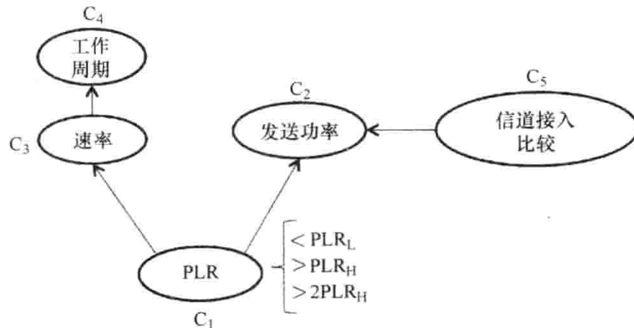


图 6.4　加权认知图发送功率、数据速率和工作周期自适应

为描述自适应协议的因果关系，采用条件边权重的概念，其因果关系用矩阵 $\boldsymbol{W}$ 来表示，如式（6.1）所示。因此，当 PLR 超过高阈值或低于阈值时，根据不等式（6.8）进行比较，这时边 $\boldsymbol{W}$（1，2）和 $\boldsymbol{W}$（1，3）根据以下规则被激活：

若 $\mathrm{PLR} < \mathrm{PLR_L}$ 或 $\mathrm{PLR} > \mathrm{PLR_H}$ 且式（6.8）为

$$\begin{cases} 真，\boldsymbol{W}(1,2)=1 \text{ 且 } \boldsymbol{W}(1,3)=0 \\ 假，\boldsymbol{W}(1,2)=0 \text{ 且 } \boldsymbol{W}(1,3)=-1 \end{cases}$$

若 PLR < 2PLR 则

$$W(1,2)=1 \text{ 且 } W(1,3)=-1 \tag{6.9}$$

式中　$\mathrm{PLR_H}$，$\mathrm{PLR_L}$——分别为设定 PLR 高低门槛值。

式（6.9）的规则简单实现了式（6.8）的算法，同时，在其基础上增添了当 PLR 高于 $2\mathrm{PLR_H}$ 时的预防措施，因为当这种情况出现时，就意味着链路质量的大幅度下降，此时，必须增加发送功率并同时降低数据速率。$2\mathrm{PLR_H}$ 值选择应是既不低到以经常变化发送功率和传输速率，也不高到足以忽略链路质量的恶化。如果 PLR 变化很大或一个节点的 ETT 明显大于干扰节点的 ETT，加权认知图会被触发并采取行动。如图 6.4 所示，通过提高发送功率，可以有效解决无法公平接入无线介质的问题。

当权重矩阵 $\boldsymbol{W}$ 形成后，CH 会形成一个类似于式（6.2）的数组，以反映式（6.4）当前被激活的概念层。根据式（6.3）进行乘法运算来计算 $A(t+1)$，它决定根据新的概念值所采取的行动。需要强调的是，乘法运算的结果并不指定发送功率和数据速率的值而是仅仅指出它们应当增加或减小。

6.4.2 设计能保障连通性和覆盖率的 WCM

无线传感器网络的两个主要制约因素是确保其始终处于连接状态和保证区域中的每个点都至少被 k 个传感器覆盖。为延长其网络生命周期，典型的无线传感器网络会具有冗余节点。在网络工作的每个周期中，每个节点被唤醒的概率为 p，此值应能确保区域中的每个点都被覆盖且每个节点都可以发现到汇聚节点的一条路由。当网络冗余节点增加时 p 值变小，若网络生命周期中有许多节点失效，其值会增加到 1。

WCM 的目标是调整节点在每个工作周期进行工作的概率 p，为完成此目标，用参考文献［11］推导出的定理，即对于每个节点而言，感知半径 r_s 和通信半径 r_c：

当 $\alpha = r_s/r_c \leqslant 1$ 时，区域（D）为安全“连通 - k - 覆盖”

对于一些增长函数 $\varphi(np)$，p 和 r_s 满足

$$np\pi r_s^2 \geqslant \log(np) + k\log\log(np) + \varphi(np) \tag{6.10}$$

式中　n——网络中的节点的数目。

“连通 - k - 覆盖”表达的意思是网络中的每一点都至少被 k 个传感器覆盖并且可以找到一条到汇聚节点的路径。安全的“连通 - k - 覆盖”意味着 n 为无穷大，此时“连通 - k - 覆盖”的概率为 1。

在网络中由于节点的失效，n 也会相应减少，因此，加权认知图（WCM）在每个工作周期都会尝试找到 p 以满足不等式（6.10）。然而，在应用这个定理前，需要找到

一个合适的函数 $\varphi(np)$，当满足不等式（6.10）时可以确保“连通 - k - 覆盖”的概率较高（可以通过仿真进行验证）。

为验证该功能，通过一个实验对其进行验证，该实验分为两部分，在第一部分，进行计算机仿真时，设定 $p=0.1$，$k=1$，$r_s=100\text{m}$，$r_c=200\text{m}$，覆盖的区域为 500m × 500m，节点数目 n 从 400 到 2000。对于每一个 n 值运行 1000 次仿真，每次仿真时节点的配置都是随机的。在每次仿真时，都检查在当前节点配置情况下的连通性和覆盖率。经过 1000 次仿真后，计算出在一定节点数目情况下的连通性和覆盖率。仿真结果如图 6.5 所示。

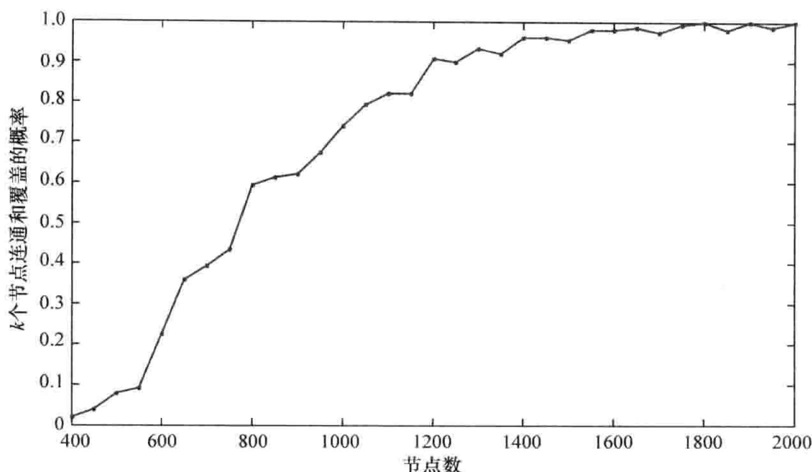


图 6.5 连通和覆盖概率

在实验的第二部分，利用不等式（6.10）进行计算，在计算时 p，k，r_s 和 r_c 的取值与在第一部分仿真时的取值相同，利用慢增长函数 $\varphi(np)=(\log\log(np))^{\alpha}$，$\alpha$ 的取值范围为 4 ~ 5.5。对于每个 α 的取值，计算满足不等式（6.10）的最小 n 值，接着利用图 6.5 的结果来计算在最小 n 值的连通性和覆盖率的概率，其结果如表 6.1 所示。

表 6.1 α 值与其相对应的 k 个节点的连通和覆盖概率

α 值	满足不等式（6.10）的最小 n 值	k 个节点连通和覆盖概率（通过仿真获得）
4.0	876	0.60
4.1	904	0.62
4.2	934	0.65
4.3	966	0.68
4.4	1002	0.74
4.5	1041	0.78
4.6	1084	0.8
4.7	1131	0.81

（续）

α 值	满足不等式（6. 10）的最小 n 值	k 个节点连通和覆盖概率（通过仿真获得）
4. 8	1184	0. 88
4. 9	1242	0. 89
5. 0	1307	0. 93
5. 1	1379	0. 95
5. 2	1460	0. 99
5. 3	1550	0. 99
5. 4	1652	0. 99
5. 5	1767	0. 99

如表 6. 1 所示，当 $\alpha=4.0$ 时，满足不等式（6. 10）的最小 n 值为 876。然而，在 $n=876$时，仿真结果表明连通 - k - 覆盖的概率仅为 0. 6。因此，$\alpha=4.0$ 不能保证连通性和覆盖率。另外，当 $\alpha=5.2$ 时，满足不等式（6. 10）的最小 n 值为 1460。在 $n=1460$ 时的仿真表明网络连通 - k - 覆盖的概率仅为 0. 99。因此，该值较好地保证了连通性和覆盖率。

在给定结果的情况下，使用以下公式：

$$\varphi(np)=(\text{loglog}(np))^{\alpha},\alpha=5.2$$

在确定了使用适当的 $\varphi(np)$ 后，可以在 WCM 中实现此算法。涉及的概念及与其相关的边如图 6. 6 所示。每个信道监视簇中节点的状态，发现活动节点的数量，通过检测由于电池失效或任何其他条件致使节点的失效。如果检测到故障，激活图 6. 6 中的 C_6，促使 CH 计算将满足不等式（6. 10）一个新值 n 最小的 p 值，当新的 p 值被确定后，路由协议将被激活去发现一个适合节点新的子集的新配置。

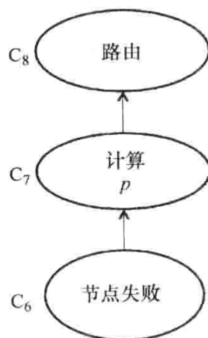


图 6. 6　加权认知图保障连通性和覆盖率

6. 4. 3　设计具有拥塞控制功能的 WCM

当网络中的某个区域所承受的流量大于它所能处理的流量时，通常会发生拥塞。这可能会造成队列建立和明显的传输时延。处理拥塞的传统方法是指示源节点来减少其负荷率，负荷率指每秒插入传输队列中的比特数。值得注意的是，这不同于节点的数据率，节点数据率对应的是从传输队列中发送的比特率。尽管减少源节点负荷率可以减少拥塞，但它有一个重大缺陷。从用户服务质量（QoS）的角度看，采用这种方法时用户需要更多的资源但却减少了给予用户的资源[5]。在无线传感器网络中，有一个解决该问题的可能性，即提高网络中可用的资源数量。参考文献［5］中提出了拓扑感知资源自适应（TARA）的方法。在 TARA，周围区域发生拥塞的休眠节点将被唤醒，数据通过这些节点进行路由选择来缓解这个问题。通常情况下，这种方法并不总是能持续整个网络的生命周期，

因此一些节点失效后并没有更多的冗余节点来唤醒。同时，它还要求对网络的拓扑有较为深入的了解。

然而，冗余节点并不是增加网络资源的唯一途径。如前撰述，既然已经使用占空比自适应，就可以利用这个特性来保持节点在拥塞期间长时间处于唤醒状态，以避免产生较大的流量。路由维护仍需避开可能导致拥塞的路径，但如果不清楚网络拓扑结构将不知道哪个节点需要被唤醒。使用自适应占空比也将会贯穿网络工作整个生命周期。路由维护操作可以缓解拥塞，其工作原理如图 6.7 所示。在图 6.7a 中，节点 A 和 B 周围的区域有拥塞，因为它们都处于彼此的干扰范围内，有大量的流量流经它们。在该系统中，两个节点将会延长其工作周期以适应额外的流量，其中一些流量的路由将通过节点 C。图 6.7b 所示的也是同样的处理过程。

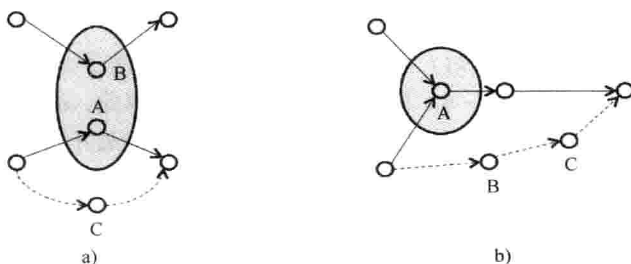


图 6.7　路由维护操作的例子

为了在 WCM 中实现该算法，必须首先确定适当的参数来检测拥塞，在此，利用缓冲区容量和信道利用率这两个参数检测拥塞，因为它们在实际网络中较为容易测量。信道利用率指的是检测到信道节点忙的时间段与预定时间段的比值，而缓冲区容量则是缓冲区内剩余可用时隙数。两个参数都需要，因为它们中的一个参数都不能很明确确定是否发生拥塞。相应的 WCM 实现如图 6.8 所示。

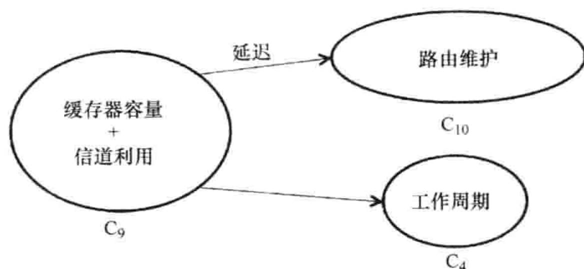


图 6.8　认知加权图拥塞控制算法

一旦缓冲区容量低于特定阈值和信道利用率高于特定阈值，节点 C_9 将被激活。这将促使占空比的增加，并触发路由维护操作。需要注意的是，每次迭代结束后，路由维护都会产生一个时延，因为它必须随着占空比的增加而增加。

6.4.4　端到端的目标和整个 WCM

对整个系统性能而言，端到端的目标的选择是最重要的，所有节点之间的交互都是为了实现这一目标。在 WCM 中，网络效率被选择为其端到端的目标，网络效率的定义为流量负荷除以消耗的能量，这种选择背后的原因是赋予网络用户更大的灵活性，使其能够在网络的整个生命周期内，请求更多数据。一般情况下，大容量的数据通常被认为会消耗更大的能量。为了达到端到端目标，仅仅选择能耗或仅仅选择网络生命周期可能导致网络拒绝给用户提供更多数据。因此，对网络效率的一个特定的阈值将由用户事先计算，WCM 将确保这个阈值不交叉。每个信道将监视它所在簇中的网络效率，汇聚节点将监测网络的效率。

系统中的能耗为电池在给定窗口时间内的偏差量除以剩余电池电量。因此，每个节点维护一个移动时间窗口并计算在这个窗口内电池电量下降量，而后能耗值将和剩余电池电量一起发送给每个数据包。因此，节点的能耗可表示为

$$\text{Eng_consump}_i = \frac{E_{\text{start_window}} - E_{\text{end_window}}}{E_{ri}} \tag{6.11}$$

式中　E_{ri}——剩余能量；

$E_{\text{start-window}}$——节点 i 在该时间窗口的开始时剩余的能量；

$E_{\text{end-window}}$——节点 i 在该时间窗口结束时的剩余能量。

式（6.11）认为保持了电池能量就保证了负载均衡，如果一个节点的剩余电池电量低，其效率会降低，会促使 WCM 采取相应行动。如果能量消耗增加，说明处理的流量过多，它的效率也会降低，也会促使 WCM 采取行动。这确保节点不被过度使用，也保证了在它们电池电量低时不被使用。

此外，流量负载定义为在某个时间窗口内任何一个节点被分配的通信量。因此，节点 i 的流量负载可以表示为

Load_i $=t$ 长度窗口内发送的比特数/t 长度窗口内向 i 节点输入的比特数

$$= \frac{R_i t_{\text{Transmission}}}{S_i t} \tag{6.12}$$

式中　R_i——节点 i 的数据速率；

t——时间窗口的长度；

$t_{\text{Transmission}}$——节点 i 在该时间窗口内发送数据的时间段；

S_i——节点 i 的源负载率。

因此，一个具有 G 个节点的簇的效率可表示为

$$\text{Efficiency} = \sum_{i=1}^{G} \frac{\text{Load}_i}{\text{Eng_consump}_i} \tag{6.13}$$

根据式（6.11）~式（6.13），如果电池消耗率增加、数据速率降低或源速率增加，WCM 将采取相应的行动，将要采取的行动将取决于节点状态。如果 PLR 足够低，那么节点可以根据式（6.8）来减小传输功率或增加数据速率。如果 PLR 不够低，路由模块

将被激活去查找合适的路由配置，以尽可能避免效率低的节点。WCM 的最终版本如图 6.9 所示。

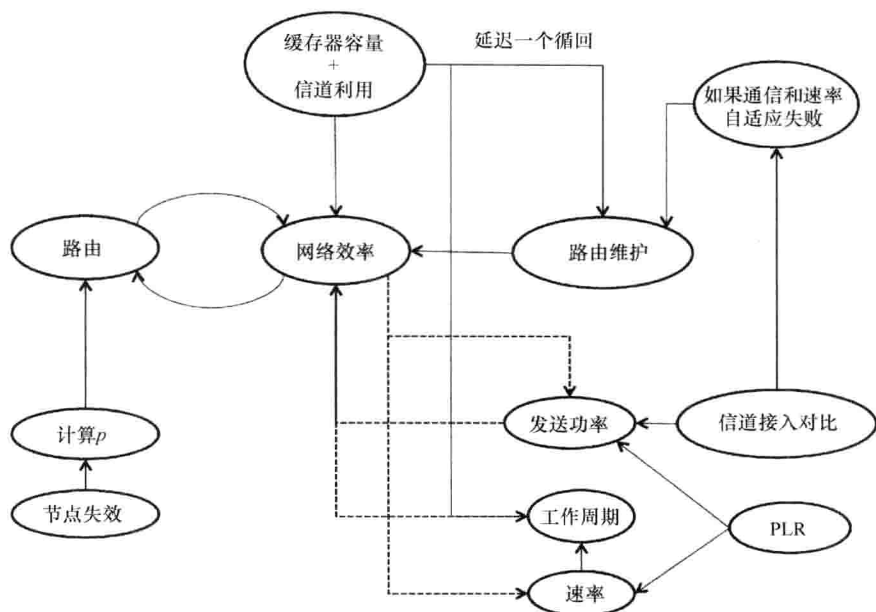


图 6.9 认知网络的整体加权认知图

如图 6.9 所示，所有的虚边都是那些进入或离开网络端到端目标效率的边。图 6.9 还显示如果发送功率和数据速率的变化不能修复特定链路，一个节点会被激活，链接被视为失效并且必须保持。同样，如果发送功率的调整未能解决 ETT 不平衡的问题，而后路由维护模块将被调用，以修复发生问题的部分路由。需要注意的是，路由维护模块和路由模块之间的区别是，路由维护模块只修复路由的一部分，而路由模块则是发现一个全新的完整的路由。因此，当一个节点的效率降低时调用路由模块，例如，因为这个节点将需要从包含该节点的一些路由中清除，因此需要对现有的路由进行大范围的修改。另外，由于链路故障或拥塞只需要数据包的路由远离有问题的区域，因此只有几个链路需要更换。在这种情况下，调用路由维护模块。

图 6.9 所示的 WCM 是在簇头和汇聚节点方面实现的，簇头和汇聚节点使用 WCM 来确定节点操作中所需要的参数。WCM 考虑对于网络性能至关重要的一些参数和问题，同时，WCM 所采用的参数是可变化的，其变化取决于 WCM 可响应的特定环境。

6.5 仿真结果

本节中，认知工具的性能是通过计算机模拟来进行评估的，所使用的传播模型为对数正态遮蔽模型。此外，为确保能体现一个全面且真实的传播环境，考虑正相关遮蔽问

题。因此，紧邻节点之间的链路将使用相似或相关的遮蔽值。主要仿真参数如表 6.2 所示。

表 6.2　仿真参数

参数	值
网格大小	50m × 50m
节点数量	169，256，400，625 和 900
发送功率电平	[−12∶6∶36] dBm
数据速率	6Mbit/s→54Mbit/s
占空比	100ms
工作周期	[0.25，0.5，0.75，1] × 100ms
数据包长度	1000B
源负载率	[0.2，0.4，0.6，0.8，1] × 10^4
电池初始电量	5A · h
能耗	收信：26mA · h 发信：26mA · h + （发信功率 × 数据包大小 × 比特持续时间） 休眠：0.3μA · h × 休眠时间
初始缓存器容量	100 个数据包

6.5.1　基于随机均匀拓扑结构的评估

这类似于在图 6.2 中进行的评估，本节主要采用一个统一的随机拓扑结构对系统性能进行评估。系统的性能与 TABU − RCC 的网络管理系统进行对比，TABU − RCC 在第 6.2 节中曾提到过，选取与之相比的原因是 TABU − RCC 系统端到端的目标是在覆盖率和连通性约束条件下的网络生命周期的最大化，它与 WCM 的目标和约束条件类似。为了提供一个基准进行比较，也会对 WCM 系统与一个没有管理或自适应协议规则网络进行比较。在比较的时候，主要对网络生命周期、吞吐量、PLR（丢包率）和网络生命周期内所传输的信息量进行比较。网络生命周期内所传输的信息量反映了系统利用可用资源发送数据包的效率。网络生命周期定义的时间为从网络开始运行的那一刻直到网络中剩余的节点不再能保证网络的覆盖率和连通性。

在所做的所有仿真中，可将时间段划分为周期或循环。在每一个周期中，节点以某个概率 p 被唤醒，在 WCM 和 TABU − RCC 中，此值在整个网络过程中一直变化以保证取得最大能量效率。节点根据源负载率、路由、发送功率和 WCM 指定的数据速率等情况发送数据包。在循环过程中的某些点，该节点将根据 WCM 指定的占空比回到休眠模式，并重复这个过程。为了确保不同的协议之间进行公平比较，在所有的仿真过程中，将源负载率、初始缓冲能力、初始电池电量、数据包大小和工作周期这些参数设置为恒定值。

在首个实验中，在不同节点数目条件下，对系统生命周期进行评估，将其生命周期

与 TABU - RCC 和没有管理或自适应协议的“正规”系统进行对比。仿真结果如图 6.10 所示。该图表明 WCM 工具获得了比其他协议更长的生命周期，特别是在大规模网络中，这种特点更为明显。在规模较小的网络中，在每个工作周期中，为保证覆盖率和连通性，WCM 必须将网络中的大部分节点置以主动方式。因此，网络管理在较小规模网络中的影响不如在较大的规模网络有那样大的影响。然而，自适应处理如发送功率和数据速率自适应，使 WCM 在较小规模网络中的网络生命周期要比 TABU - RCC 长些。在较大规模网络中，WCM 的网络生命周期更长，这清晰地显示了 WCM 作为网络管理系统时的效率。从图中可注意到，没有管理或自适应实现的常规网络性能较差，因为它没有能力利用可用的冗余节点。因此，不管网络中节点数目有多少，所有的节点在每个工作周期都会切换，这就是网络生命周期在所有节点数目均保持恒定的原因。

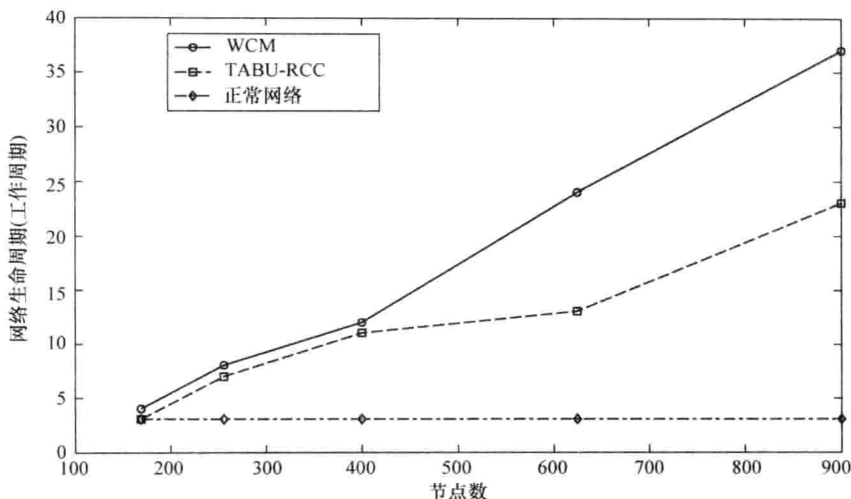


图 6.10 WCM 与其他系统的网络生命周期比较

在接下来的实验中，将对 WCM 系统在网络吞吐量和 PLR（丢包率）方面性能进行评估，并与 TABU - RCC 和常规网络进行对比。其仿真结果如图 6.11 和图 6.12 所示。

如图 6.11 所示，WCM 系统具有最大的网络吞吐量，特别是随着网络规模的增加，系统达到了最高的吞吐量的结果。在小规模网络中，WCM 系统的影响可以实现最小化，随着网络规模的增大，发送功率和数据速率自适应产生的影响变大，尤其是在其整个生命周期中，由于节点的失效而导致网络拓扑结构的变化时，其影响更大。这说明 WCM 具有适应不断变化网络的能力。

图 6.12 表明 WCM 系统的 PLR 最低，这是由于其具备发送功率和数据速率自适应的结果。TABU - RCC 也实现了低 PLR 的效果，因为它具备在每个工作周期内使最小数目节点工作的能力，从而减少干扰，而常规网络由于不具备自适应功能和管理功能，在每个工作周期中由于其节点全部工作，这导致较高的干扰和碰撞，由此造成了高 PLR。同时，也可以看到，常规网络的 PLR 随着节点数量的增加而增加，因为网络规模的增

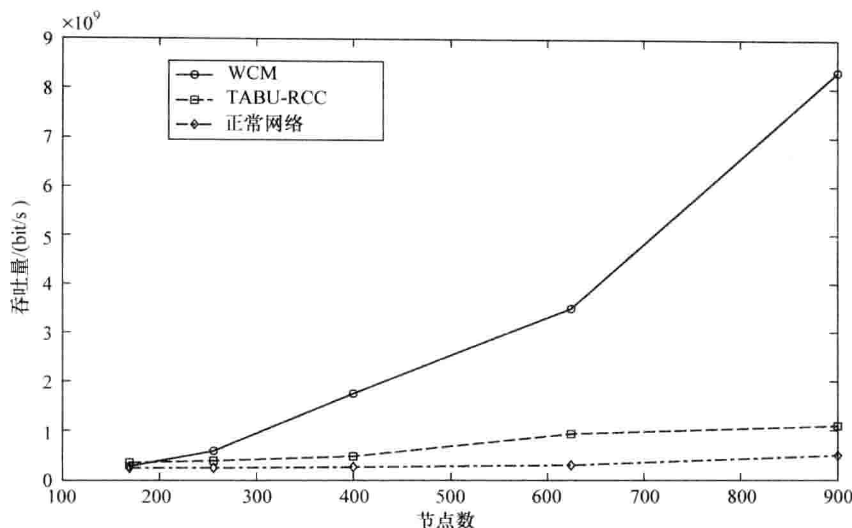


图6.11　WCM与其他系统的吞吐量比较

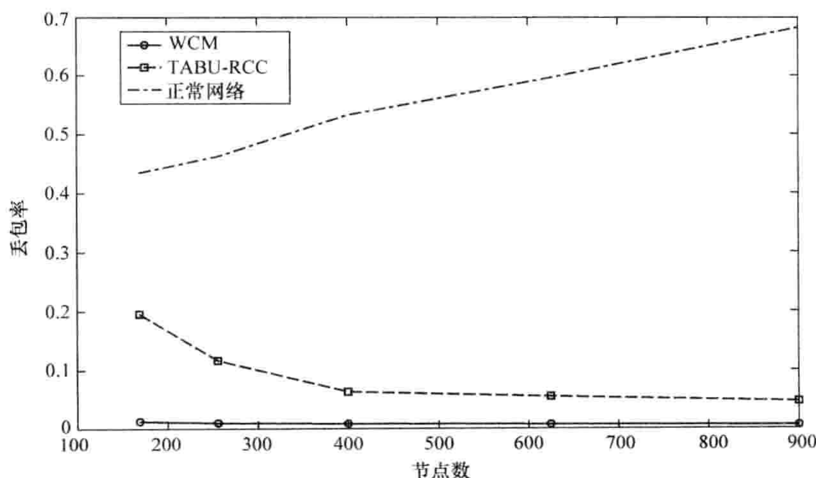


图6.12　WCM与其他系统的丢包率比较

加会造成更多的干扰和更多的碰撞。

在接下来的实验中，将对WCM系统使用信息传播资源方面的能力进行评估，评估主要是通过计算网络生命周期内网络中的所有节点发送数据包总量而实现的。计算的数据包的总量与TABU－RCC和常规网络进行比较。

图6.13显示WCM系统在网络生命周期内特别是在网络规模大的情况下能够发送大量的数据包。图6.13结合图6.11和图6.12可以说明WCM系统在利用可用资源方面最大限度地提高了网络效率。从图6.13中还可以看出，常规网络在规模较小时也发送

大量数据包，这是由于网络中所有节点都处于工作状态。TABU - RCC 网络发送数据包的数量接近常规网络所发送数据包的数量。然而，从图 6.12 中可以看出常规网络的 PLR 是相当高的，这意味着所发送的数据包中有很大一部分会丢失。因此，这种类型的网络并不是很有效的网络。

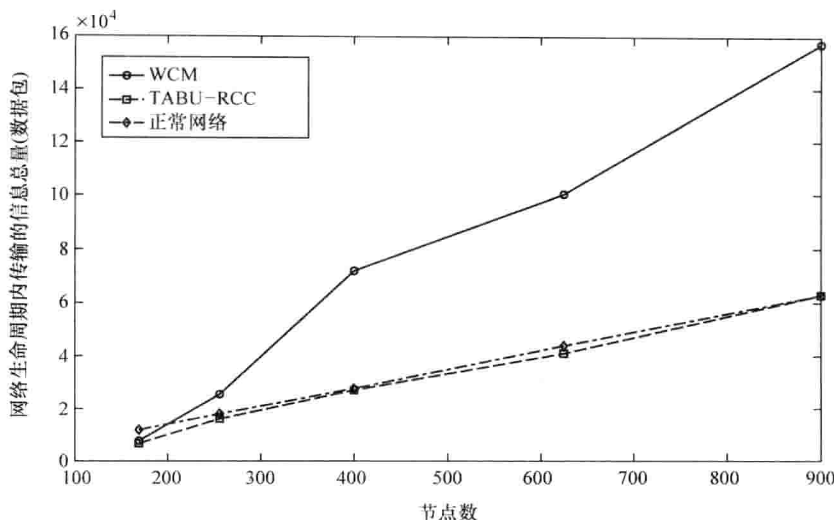


图 6.13　WCM 与其他系统的信息传播能力比较

6.5.2　使用瓶颈路径进行评估

本节主要在不同网络场景中对 WCM 工具的性能进行评估，目的是确定 WCM 能否适应不同的网络拓扑结构。在此，采用一种传输都必须通过有限一组节点的网络拓扑结构，必须通过的这组节点形成了网络瓶颈区域。

如图 6.14 所示，所有的传输都是必须通过一组有限的路径。本节同样采用网络生命周期、吞吐量、丢包率以及网络生命周期内发送的数据包总数等指标对 WCM 系统的性能进行评估。在进行评估时，为了确保对不同协议进行比较，将源负载率、缓冲区初始容量、电池初始电量、数据包大小和工作周期设为常数。图 6.15 显示了 WCM 系统与 TABU - RCC 和没有自适应功能的常规网络就网络生命周期进行比较。

如图 6.15 所示，WCM 系统实现了较长的网络生命周期，特别是在规模较大的网络中，其网络生命周期更长。在网络规模较小时，TABU - RCC 和常规网络并不工作，这是因为它们不能调整其参数以保证网络的连通性。同样，它们两个网络的生命周期在不同网络规模时都相同，这是因为两个网络的生命周期都取决于瓶颈区域节点的生命周期，而瓶颈区域的节点数目并不随着网络规模的增大而变化。然而，采用 WCM 时，发送功率和数据速率可以调整，瓶颈区域中节点并不是在每次传输中都使用，从而其提供了更好的负载均衡，因而提高了网络的生命周期。

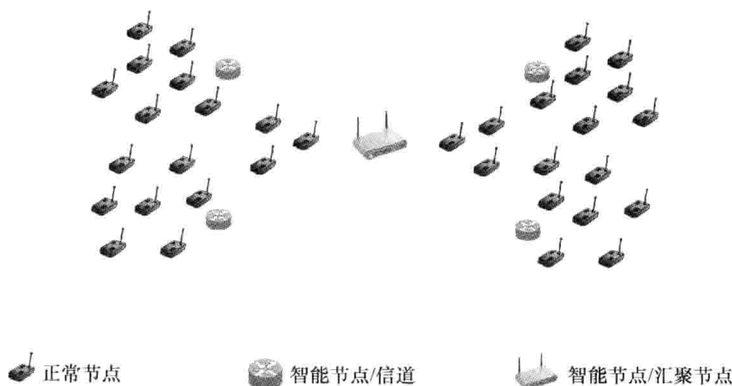


图 6.14　瓶颈路径下的网络拓扑结构

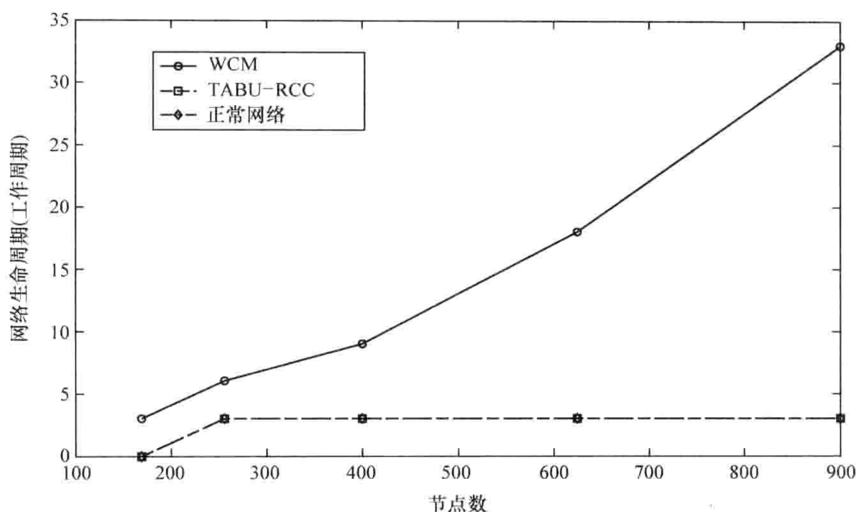


图 6.15　在瓶颈路径中 WCM 的网络生命周期

接下来的实验对 WCM 系统的吞吐量和 PLR 性能进行评估。仿真结果如图 6.16 和图 6.17 所示。这表明，WCM 系统在吞吐量和丢包率方面性能较好，在规模较大网络中两方面性能更有所提高。图 6.17 也显示出随着网络规模增大，常规网络的 PLR 也增加，这证实了图 6.12 中的结果。

在最后的实验中，对 WCM 在网络生命周期内数据包传输信息的能力进行评估。仿真结果如图 6.18 所示，WCM 系统能够更有效地利用网络资源，可以在网络生命周期内传输大量的数据包。在较小规模的网络中，三种系统传输的数据包数目很接近，这是因为可用资源是有限的。图 6.18 还显示，TABU - RCC 传播信息的能力与没有自适应和管理功能的常规网络很接近，这是因为瓶颈路径成为制约传输能力的主要因素，而瓶颈路径的传输能力是有限的。而 WCM 系统克服了这一缺点，因为它具备可调整参数的能

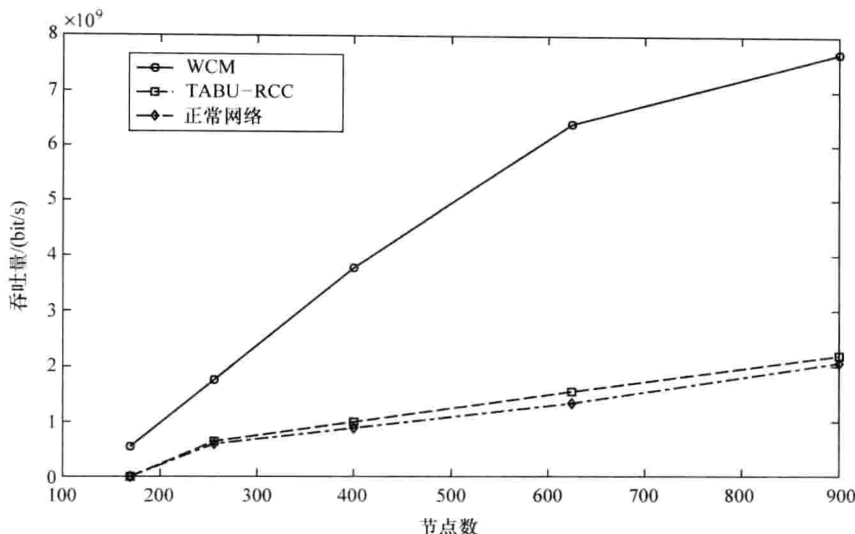


图 6.16 在瓶颈路径中 WCM 的吞吐量

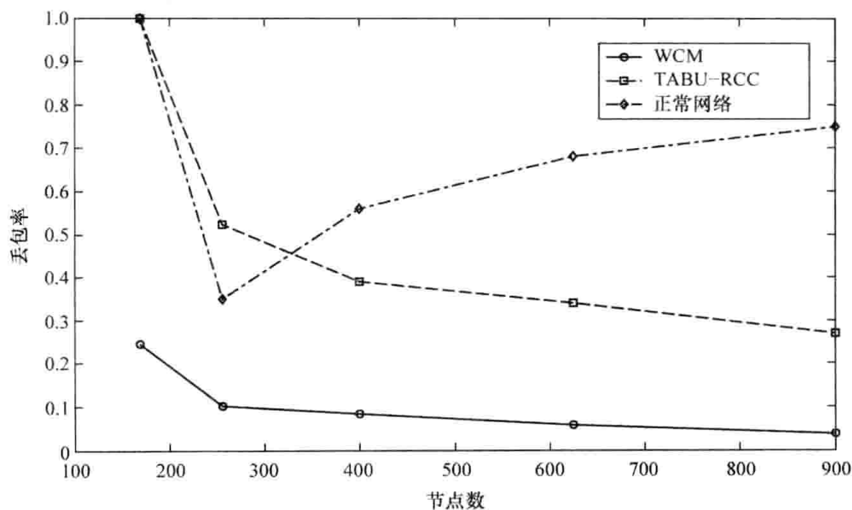


图 6.17 在瓶颈路径中 WCM 在瓶颈路径下的丢包率

力，从而提高了节点利用率。

6.5.3 系统的复杂性

一个系统的复杂性可以分为两个主要部分：计算复杂性和通信开销。计算的复杂性可以采取多种方式进行定义，这使得有时难以对其进行量化。在本章中，将计算复杂度视为执行协议所需的步骤数，它与处理时间成正比。另外，通信开销通常是指实现协议

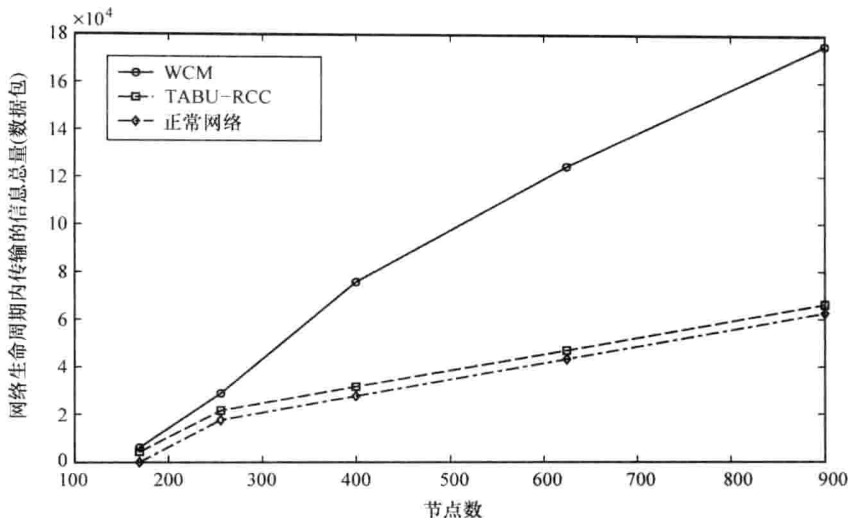


图 6.18　在瓶颈路径中 WCM 的信息传输能力

所需的额外控制数据包。

协议的执行需要简单的 WCM 矩阵乘法运算，激活的参数确定输入矩阵，节点的状态决定了 WCM 矩阵。因此，该协议不需要进行问题优化所需的广泛搜索操作或循环，这使得系统的处理时间相对较短，也意味着它可在网络变化之前迅速做出反应。同样，需要注意的是，WCM 系统的计算复杂度与包含的步骤数目成正比。这给网络设计者在选择所需的复杂程度时提供一定程度的灵活性。例如，如果在网络流量较小，可以消除导致网络拥塞的一些参数，使网络运行速度更快。网络设计人员必须确保所涉及参数的性能增益远大于由此导致的复杂性。

WCM 系统还需要在通信开销上有所增加，增加的开销用于一些协议执行的信息，如 PLR 水平、电池的消耗、信道利用率，可以简单地装载到传输数据包。如果某些节点根据簇头的情况需要采取紧急行动时可能需要特殊格式的数据包。在无线传感器网络中，节点将周期性地发送传感信息，这意味着数据包对加载信息有用。

6.6　结论

本章提出了一个基于 WCM 的无线传感器网络认知网络管理协议。在考虑多个目标和约束条件下，WCM 系统能够进行有效的推理。由于考虑到保持网络中的所有元素，WCM 能够确保所有操作的一致性。WCM 持续监视着用户所要求的 QoS，一旦 QoS 恶化，WCM 将采取快速而高效的措施，这主要通过避免高复杂度而实现，而这种高复杂度通常是优化问题所需要的。

为了评估系统性能，进行了大量的计算机仿真，并在仿真中将 WCM 与其他常用的

协议相比。仿真结果表明，WCM 系统能够高度动态地适应网络状况变化，并能够根据网络变化迅速做出反应。正是由于这些原因，WCM 在网络生命周期、吞吐量和 PLR 方面优于其他协议。

参考文献

1. R. Thomas, D. Friend, L. DaSilva, and A. MacKenzie, "Cognitive networks," Chapter 2 in H. Arslan (Ed.) *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, Springer, 2007, pp. 17–41.
2. C. Facchini and F. Granelli, "Towards a model for quantitative reasoning in cognitive nodes," *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, December 2009, pp. 1–6.
3. A. Chamam and S. Pierre, "On the planning of wireless sensor networks: Energy-efficient clustering under the joint routing and coverage constraint," *IEEE Transactions on Mobile Computing* 8, no. 8, August 2009, pp. 1077–1086.
4. Y. Jin, L. Wang, J.-Y. Jo, Y. Kim, M. Yang, and Y. Jiang, "EECCR: An energy-efficient *m*-coverage and *n*-connectivity routing algorithm under border effects in heterogeneous sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 58, no. 3, March 2009, pp. 1429–1442.
5. J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "TARA: Topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems* 18, no. 7, July 2007, pp. 919–931.
6. G. Vijay, E. Bdira, and M. Ibnkahla, "Cognition in wireless sensor networks: A perspective," *IEEE Sensors Journal* 11, no. 3, March 2011, pp. 582–592.
7. J. Dickerson and B. Kosko, "Virtual worlds as fuzzy cognitive maps," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, September 1993, pp. 471–477.
8. A. Tsadiras, "Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps," *Journal on Information Sciences* 178, no. 20, October 2008, pp. 3880–3894.
9. X. Luo and X. Zhang, "Guided gamed-based learning using fuzzy cognitive maps," *IEEE Transactions on Learning Technologies* 3, no. 4, October 2010, pp. 344–357.
10. X. Zhao, E. Bdira, and M. Ibnkahla, "Joint adaptive modulation and adaptive MAC protocols for wireless sensor networks," submitted to *International Journal of Distributed Sensor Networks*, December 2011.
11. G. Yang and D. Qiao, "Critical conditions for connected-k-coverage in sensor networks," *IEEE Communications Letters* 12, no. 9, September 2008, pp. 651–653.
12. K. Ramachandran, R. Kokku, H. Zhang, and M. Gruteser, "Symphony: Synchronous two-phase rate and power control in 802.11 WLANs," *IEEE/ACM Transactions on Networking* 18, no. 4, August 2010, pp. 1289–1302.
13. A. El-Mougy, *Weighted Cognitive Maps for Cognitive Wireless Sensor Networks: Design and Analytical Analysis*, PhD diss., Queen's University, 2012.
14. A. El-Mougy and M. Ibnkahla, "Cognitive WSN design using weighted cognitive maps," *IEEE Transactions on Wireless Communications* (submitted for publication), 2012.

第7章 基于GPS/INS无线传感器网络的硬件结构

7.1 概述

无线认知传感器网络在硬件上的实现仍处于早期研究阶段，且目前针对此问题的研究工作也不多。参考文献［24］和［25］实现了两种无线传感器网络的认知体系架构，认知节点在架构中起着重要作用。在第一种架构中包含一个具有高计算和高能量的认知节点，它的作用是通过收集环境、用户及网络信息并制定能量管理和事务处理策略。在第二种架构方案中，每个簇或每组簇都有一个认知节点。现场试验的结果表明，与非认知网络相比，认知网络的网络生命周期有了很大提高。同样，由于认知传感器需要具有“普通”簇头所不具有的特性，所以加入特定认知传感器的想法完全合理。

本章主要讲述了基于位置信息的无线传感器网络硬件的实现。在许多无线传感器网络应用中，分布的传感器节点收集各自位置的信息，每个节点的位置信息常常是需要的。此外，位置信息也被电信系统如路由协议本身所使用，一个典型的例子是LAR（Location - aided Routing，位置辅助路由）协议，此协议使用位置信息来降低路由发现的开销[1]。许多其他路由协议，如GeRAF，也基于节点的位置信息[2-4]。此外，认知方法也常常需要位置信息，如认知分集路由（第5章）。

全球定位系统通常被用来确定无线传感器网络中的节点空间坐标。一般情况下，GPS需要来自至少四个卫星的视距信号来确定接收者的位置坐标。一个单独的GPS在信号恶劣的环境中，如室内或者大峡谷等，常遭遇信号阻塞。在不同的应用中，捷联式惯性导航系统（SINS）和GPS的集成已经被广泛研究和部署。在这些集成系统中，SINS以非常高的速度（常高于50Hz）提供位置、速度和方向信息并可短时间内将其精确输出。然而，它的性能随着时间降低很快。因此，GPS和SINS是互补的，它们可以互相弥补对方的缺点。为了获取持续的导航信息，集成GPS和SINS是非常重要的。

标准惯性导航系统用高价的加速计和陀螺仪来提供精确的导航信息，导致其在一般用户终端设备中普及受限。随着微机电系统（MEMS）技术的不断发展，低价MEMS惯性传感器为GPS/INS集成导航系统提供了一个比较经济的解决方案[5-8]。尽管MEMS传感器使得导航系统价格有所下降、体积更小且电力效率更高，但是其性能因为高速移动、易受温度变化等缺点影响而性能相对较低。其结果是，如果没有来自外部导航测量的更新，INS的错误会在短时间内迅速累积。这些错误可以通过高质量集成算法如卡尔曼滤波（KF）不断地更新而减少，这样精确度便可以一直被控制在可接受的范围之内。在许多SINS/GPS应用中，卡尔曼滤波器作为一种普通的数据融合算法被广泛运用[7-9]。卡尔曼滤波器是建模过程中的最佳滤波器，但它也存在一些缺点，为了使其更好地工

作，通常需要对系统动态模型进行预定义。如果输入数据不适合这些模型，那么得到的结果也不会令人满意[10]。一些错误状态的可测性也是一个很重要的问题。此外，如果传感器噪声很高，KF 的性能就会大幅度降低[11]。尽管在导航应用中还有其他的集成 INS/GPS 算法（如神经网络）已被证实也有效，但是 KF 仍是计算效率高及非常适合实时应用的算法。因此，这里仍使用 KF 作为 GPS 和惯性传感器中输出的导航数据融合算法。

在陆地导航系统应用中，有时假设系统运行在弱信号环境中，即短时间 GPS 信号频繁中断。一些先前的研究已成功地证明，集成系统在 GPS 中断期间能够提供精确可靠的导航方案。NovAtel 黑钻系统，集成了一个 NovAtelOEM4 GPS 接收器和一个 Honeywell HG1700 惯性测量单元，此系统经测试表明它可在 GPS 中断期间能够很好地工作。此外，精确性可以利用现场校准技术，速度匹配校准及非完整性约束得到提升[12]。

近年来，在实时嵌入式系统中如何集成 GPS/INS 技术方面展开了许多研究。其中，基于 MEMS 的 IMU 在整个系统的经济性和实用性起到了很重要的作用。

参考文献［13］提出了一个 MIMU/GPS 集成系统，此系统基于一个嵌入 PC/104 的微型计算机，MIMU 模块有三个 MEMS 陀螺仪和三个 MEMS 加速计，六个惯性传感器信号被定制的数据采集板上的复合模拟数字转换器处理，微编程控制的直接内存访问（MCDMA）技术被引进来提升实时数据计算及快速数据转换。

Qu 等[14]描述了一个小型/低价导航系统，该系统的辅助处理器由一个数字信号处理器（DSP）和一个复杂的可编程逻辑设备（CPLD）组成来开发硬件系统。在该系统设计中，拥有快速计算能力的 CPLD 主要用来做矩阵运算，数字信号处理器用来控制及决策整个系统。

参考文献［15］描述了基于现场可编程逻辑门阵列（FPGA）和浮点数字信号处理器（DSP）的小巧低耗能的 GPS/INS 系统的开发过程。这里采用 FPGA 来制作 GPS 数据采集的有效接口。FPGA 中的内部双口内存（DPRAM）被用来在 GPS 和 DSP 之间进行异步数据传输，这样可以极大地减少 GPS 在导航处理器上的处理开销。同时，它采用一个 16 位、250kHz 的模数转换器（ADC）（ADS8364，德州仪器公司[16]），这种仿真器可以同时采样所有来自惯性传感器的模拟信号，而无须多个 ADC 在不同时间接受对各个信息进行信号采集。

本章描述的是对无线传感网络中传感器节点低能耗、小型化导航系统的设计，其中价格、体积及能耗是考虑的主要因素。该系统最早在参考文献［23］中提出，它应用的是 2D 松耦合 GPS/INS 集成方法，并描述了基于单一定点数字信号处理器（DSP）实时系统的发展情况。该系统利用单独的 4.5V 电源供电。为降低能耗，系统使用一个可编程接口控制器（PIC）作为微控制器来探测导航板的运动和加速度并控制各种线路和集成电路的供电。运动探测体系利用微控制器单元（MCU）PIC16F886 的低能耗唤醒特性，这样便能大幅降低导航板静止时的能耗。

本章的其余部分结构如下：7.2 节描述系统的构架；7.3 节描述软件实现的细节；7.4 节给出了相应的实验案例。

7.2 硬件实现

系统的硬件架构如图7.1所示。图7.2展示了导航板的最终布局。系统组件分为五个主要模块：

1）数据采集组件：惯性传感器，GPS，磁传感器。

2）数据处理单元：数字信号处理器（DSP）。

3）能量管理单元：微控制器。

4）无线电收发器。

5）电源。

这些组件会在后文中一一介绍。

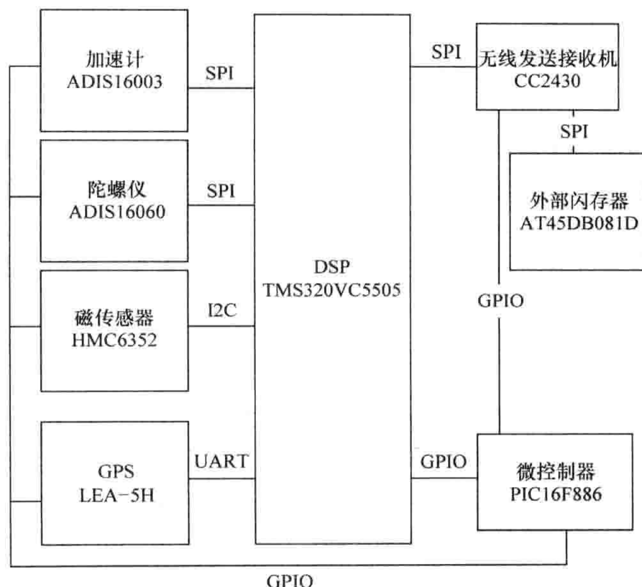


图7.1 系统结构

7.2.1 GPS和惯性导航数据采集

为了降低价格，导航板上的惯性测量单元（IMU）包含少量的惯性传感器，这些传感器包括来自Analog Devices公司的单轴±80°/s的偏航角速度陀螺仪ADIS16060[17]和一个双轴±1.7g加速计ADIS16003[18]。加速计和陀螺仪都在3.3V电压下工作。7.4节将对其进行描述。

来自μ-blox公司的GPS接收器被用在提出的集成系统中，其小巧的尺寸、低能耗、高可靠性定位功能（圆概率误差为2.5m）及高敏感性（高灵敏性及带有18个跟踪信道的高抗干扰性）[19]使它成为现有商业产品的适合选择。

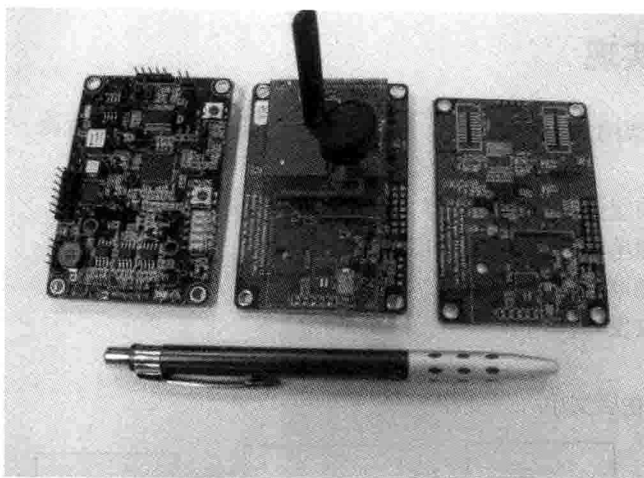


图 7.2 系统印制电路板（PCB）

GPS 模块利用通用异步收发传输器（UART）接口来传递数据，采用全国海洋电子协会（NMEA）数据传输协议传送位置信息，串行数据以 NMEA 语句的形式通过 ASCII 编码方式进行传送。数据采集进程在数字信号处理器（DSP）中进行，DSP 用来解析 NMEA 语句，提取有价值的信息如经度、纬度及时间标签等，然后将其转化为二进制代码。

7.2.2 导航数据处理

这种设计中使用的数字信号处理器（DSP）是一个德州仪器 TMS320C5000 家族中的一员：有 196 针定点的 TMS320VC5505。由于该 DSP 具有在核心电压为 1.3V 时最大 CPU 工作频率为 100MHz 下运行的能力，使得其在低能耗应用的设计中非常适用。

为了提升实时性能并降低数据采集开销，许多 GPS/INS 应用利用现场可编程逻辑门阵列（FPGA）来辅助数字信号处理器（DSP）接受导航数据。FPGA 和 DSP 的集成能够大幅度提升计算效率，因为 DSP 可以直接取数据而不需等待低速的串口 I/O 操作。尽管实时系统在高采样数据速度案例中可以从 FPGA 中获益很多，但是当在采样速率低的时候，一个单一的 DSP 也可以提供可与之可比的性能。此外，更重要的是只带有一个 DSP 的导航系统更简洁小巧，这符合能量和价格敏感的无线传感应用。

7.2.3 功率管理

通常，微处理器能耗是无线传感器应用中非常重要的设计标准之一。为了使系统能耗降到最低，通常利用运动探测系统来优化能量管理。当无线传感网络节点静止，其位置固定时，GPS 和惯性传感器都一直关闭直到节点又开始移动。

利用 PIC16F886 型号的微处理器单元来实现运动探测的设计，它具有超低能耗唤醒功能的特性，此功能可用来定期将微处理器从休眠状态唤醒。它为电容充电，并提供低

电压中断，并处于休眠状态。当电容电压低于 U_{1L}时，一个唤醒中断会再次唤醒处理器。

运动探测系统的设计思想是使 PIC MCU 处于睡眠和唤醒状态间转换，并使微控制器的休眠时间最大化，这样会使总能耗降到最低。图 7.3 显示运动探测系统的工作流图。在一段特定时间（即探测周期，探测时间段由定时器设置），微控制器等待外部的中断，如果在探测周期内没有外部中断，将会产生一个定时中断，微控制器将进入超低能耗休眠模式。否则，如果目标摇动或者运动被探测到，计数器会增加，微控制器（MCU）将进入运动确认模式并等待下一次外部中断。如果计数器到达运动阈值，微控制器（MCU）就会将连续探测到运动的信息发送给数字信号处理器。

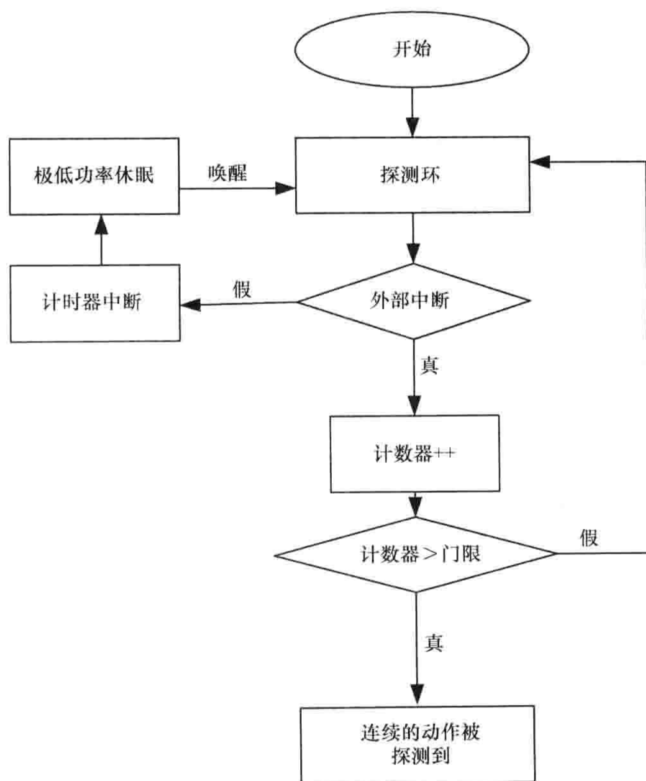


图 7.3　运动探测流程图

7.2.4　无线电收发器

CC2430 是来自德州仪器公司的系统芯片解决方案，它包含一个高性能低能耗的 8051 处理器内核和一个频率工作在 2.4GHz 且符合 IEEE 802.15.4 标准的无线电收发器。它非常适合于超低能耗的系统。当微控制器工作在 32MHz 时，收发器的能耗通常低至 27mA。此外，它有四个易适应在低能耗和活跃模式间快速转换的电源模式，这可以有效地降低在低占空比系统中的平均能耗。

为测量通信范围，需要在一个开放的现场环境进行范围测试。在测试中，发射器向接收器不间断地发送数据包。CC2430 有一个内置的接收的信号强度指示器（RSSI），RSSI 会从其一个特殊功能寄存器读出数值，测试中用到的 RSSI 读取的值是最近接收的 32 个数据包的平均值，数据包错误率（PER）和 RSSI 值是决定测试的通信质量的主要参数。

基于该范围进行的测试，当发送功率为 19dBm（设备能耗 32.4mA）[20]时，在视距传输的情况下，两个 CC2430 节点间的无线电链路有效范围大约是 277m。

7.2.5 电源

导航板需要的电源组是 [1.3V, 1.8V, 3.3V, 5V]，所有外围设备使用的是 3.3V 和 5V 的电源。在数字信号处理器（DSP）中，内核电压为 1.3V 和 1.8V，I/O 引脚的电压为 3.3V。直流电源最初由 TPS61032 型固定输出升压转换器提供的 5V 电压，后来改为由 3 块 2A 电池（3×1.5V）提供电压，TPS61032 转换器同时也可提供 DSP 所需的中断信号。1.3V、1.8V 和 3.3V 由三个 TPS76601 可调低压差稳压器提供，DSP 加电顺序为，在 I/O 层电压加电前（3.3V）必须先将核心层电压（1.3V 和 1.8V）先加电。因此，5～3.3V 转换器的 ENABLE 信号通过一个 NPN 型三极管与 5～3.3V 转换器的 POWERGOOD 引脚相连，这样就确保了 DSP 核上电与 I/O 层上电之间存在足够的时延。电源电路的详细设计如图 7.4 所示。

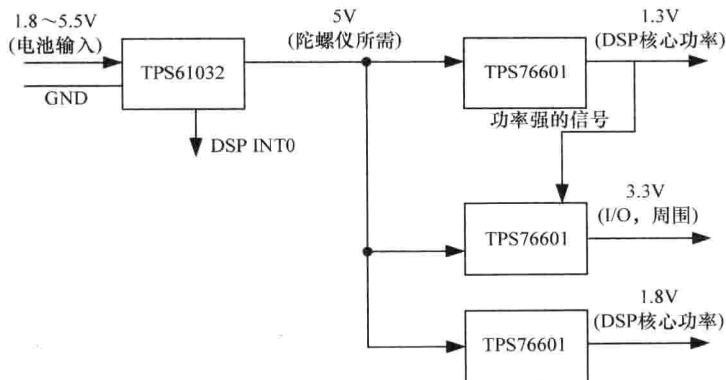


图 7.4 电源电路设计

7.3 系统软件设计

7.3.1 系统初始化

系统初始化过程包括数字信号处理器（DSP）时钟频率配置、并行端口配置及其外围设备的初始化（见图 7.5）。各种外部中断及中断服务进程如下所述：

1）当 C5505 的 D6 针产生复位信号时，数字信号处理器（DSP）中断执行并加载带有复位向量内容的程序计数器，这将使程序返回到 ROM 片上引导加载器。在完成复位中断服务进程后，程序重启初始化函数。

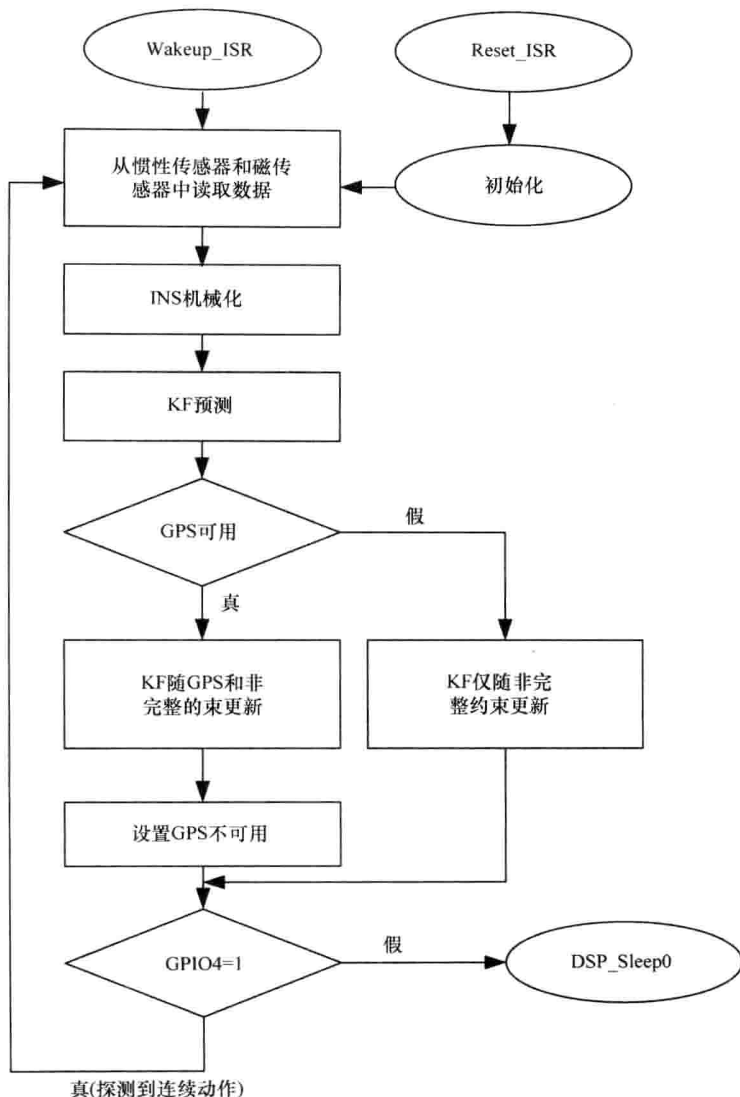


图 7.5　系统软件流程图

2）当电池电压低于 1.8V 时（使低电压输入值低于 500mV），低电压探测电路将使低电压输出（LBO）指针产生一个逻辑低电平信号，这个信号可使程序跳到 BatteryPower_ISR，该中断进程将停止程序运行，同时 M8 针的 LED 灯作为低电压报警灯会闪。

3）当 GPS 经由通用非同步收发传输器发送超过连续 70B 的一系列数据（只要 GPS

推荐的最小长度数据包含了所有信息）到DSP时，将产生一个通用非同步收发传输器（UART）中断。如果GPS接收机能够与足够多的可见卫星建立连接，则位置和时间信息将可以从这些原始系列数据中解析出来并进行保存。

4）当导航载体处于静止状态时，DSP进入休眠模式，当可编程接口控制器（PIC）微控制器（MCU）探测到运动时，将会向DSP内核发送一个逻辑高电平信号。唤醒信号也可以由印制电路板的一个按钮产生。

7.3.2 系统能量管理

在许多应用中，对能耗最小化并延长嵌入式系统的生命周期有特殊的要求。C5505有如下几种管理能耗的方法：

1）利用软件可控模块门控时钟，C5505能有选择性地激活一些子系统并保持其他子系统处于非激活状态。

2）当系统不运行时，片上内存可被置于低泄露能量模式，并保存内存内容（DARAM/SARAM低能耗模式）。

3）独立电源允许用户关闭DSP部分功能从而降低静态能耗。

由于导航板使用电池作为其能量供应，所以对于软件设计来说，低能耗是首要的需求。为减小能耗，数字信号处理器（DSP）根据运动探测微控制器发送的信号不确定是运行在休眠模式还是活动模式，并根据信号的变换在两种模式下进行相应转换。

能量模式如下所述：

（1）休眠模式：

1）系统及所有外设时钟不工作。

2）芯片内存处于记忆保存模式（处于低能耗模式以保存内存内容时）。

3）通过将系统时钟产生器设置为旁路模式、锁相环（PLL）设置为低能模式，关闭时钟产生器组。

4）清除并关闭所有中断。

5）开启适合的唤醒中断。

（2）活动模式：

1）开启系统时钟和内部集成电路、通用异步收发传输器及串行外部接口时钟。

2）芯片内存处于启动模式。

3）启动时钟产生器组。

4）定期检查运动探测微控制器的通用输入输出引脚：如果输出变低，使DSP再次进入休眠模式。

类似地，当运动探测微控制器（MCU）显示节点在运动时，CC2430运行在其全功能模式PM0（参考文献［16］有关于PM0更多的信息）。

如果导航板在一段时间没有运动，CC2430会启动一个外部I/O中断并进入低能耗的PM3模式，在这种模式中，为所有内部电路提供能量的电压调节器都会关闭。一旦导航板开始运动，CC2430将会被PIC MCU发出的启动外部中断所唤醒，进入PM0模

式，并从进入 PM3 模式时的位置开始。

7.3.3 DSP 存储器分配

C5505 导航计算通过在代码调试模拟环境中运行 DSP 来检测，计算中涉及的大多数变量为双精度格式（64 位）。C5505 是一个定点 DSP，当密集运算无法避免时，截断或舍入数字时会有误差产生。为了研究误差，DSP 输出和相关的 MATLAB 模拟结果对比如表 7. 1 所示。

表 7. 1　DSP 与 MATLAB 计算精度对比

	区别
纬度	<0. 000 002°（0. 21577m）
经度	<0. 000 002°（0. 21577m）
向北速度	<0. 4m/s
向东速度	<0. 4m/s
偏航	<0. 020rad/s（1. 1459°/s）

C5505 芯片有三种类型的芯片内存：128KB ROM、256KB SARAM 和 64KB DARAM。因为内部存储器对于导航计算和系统运行已足够，所以 DSP 无须外部 RAM。代码调试器产生的内存分配映射见表 7. 2。该表显示总的全部可用内存为 86. 7481KB，其中 46. 3848KB 内存占用在 DARAM，包括堆栈的 35KB、栈中 5KB 和系统栈 5KB。

表 7. 2　CCS 生成的存储地图报告

名称	源点/B	长度/B	已用/B（十六进制）	已用/B（十进制）
MMR	00000000	000000c0	00000000	0
DARAM	000000c0	0000ff40	0000b98a	46. 3848KB
SARAM	00030000	0001e000	0000a174	40. 3633KB
SARAM_0	00fe0000	00008000	00000000	0
SARAM_1	00fe8000	00008000	00000000	0
SARAM_2	00ff0000	00008000	00000000	0
SARAM_3	00ff8000	00008000	00000000	0
			占用字节总数：86. 7481KB	

7.3.4 ZigBee 节点软件设计

典型的 ZigBee 网络是一种多跳网络，它支持电池供电设备之间的短距离无线通信，具有低功耗、低成本和低数据速率等特点[21]。它由三种逻辑设备类型组成：协调器、路由器和终端设备。本节主要描述 ZigBee 网络中传感器节点和汇聚节点之间的软件流程。汇聚节点作为协调器，传感器节点作为终端装置。

1. 汇聚节点

德州仪器公司带有 CC2430EM 的仿真器 SmartRF04EB 被用来开发和调试汇聚点程序[22]，它将初始化导航板硬件配置，创建一个网络标示符并广播先前接入网 ID 来建立网络。当电源开关打开时，协调器将扫描所有的信道并选择能耗最小的一个。

任务系统基于多任务机制，其主要循环运行在操作系统抽象层，该层可以实现一次协作式轮询任务服务循环。每个操作系统抽象层任务首先必须要初始化，包括应用程序对象变量的初始化、相关应用程序对象的实例化及在适合的操作系统抽象层或硬件抽象层系统服务中注册。为了处理任务的所有事件，用户定义的事件要添加到任务事件处理器中。汇聚节点任务事件处理器的事件处理流程如图 7.6 所示。

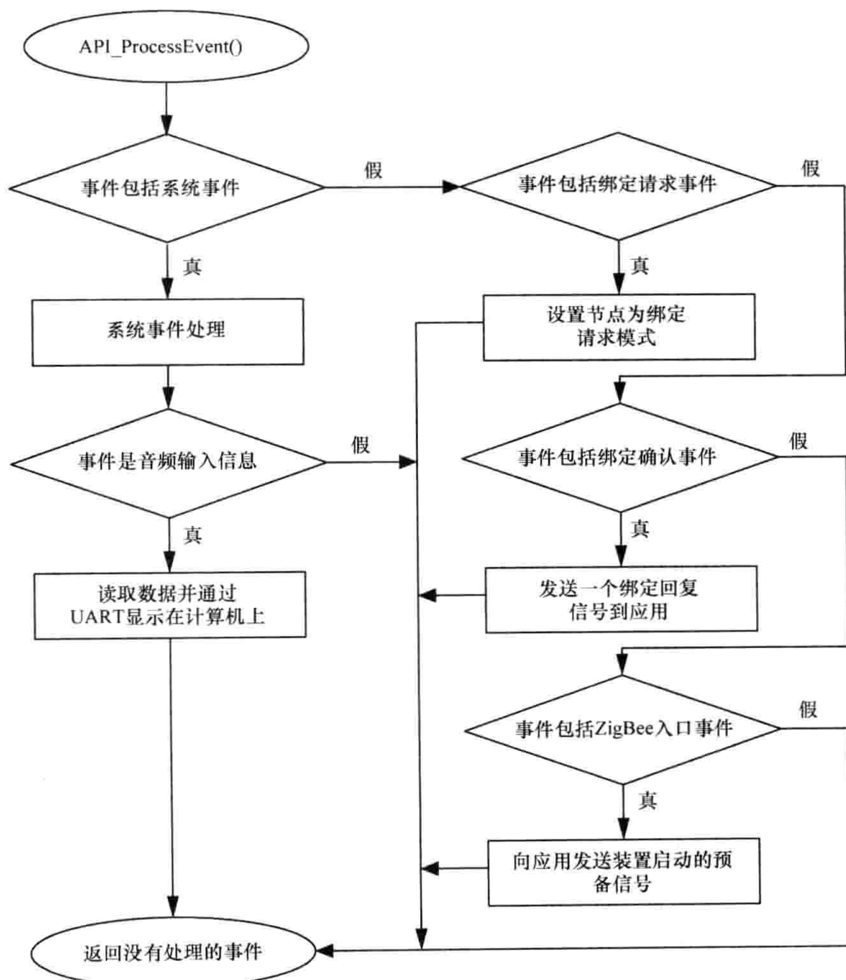


图 7.6 汇聚节点任务事件处理器的事件处理流程

2. 传感器节点

在 ZigBee 网络中，传感器作为一种终端装置，它仅能接收和传递信息给其父节点（路由器或者协作器）而没有路由功能。同时，它还是用电池供电的节点，根据网络的需要处于睡眠和唤醒模式。带有收发器芯片 CC2430 RF 的导航板在网络中被用作终端设备。传感器节点的任务事件处理器的事件处理流程如图 7.7 所示。

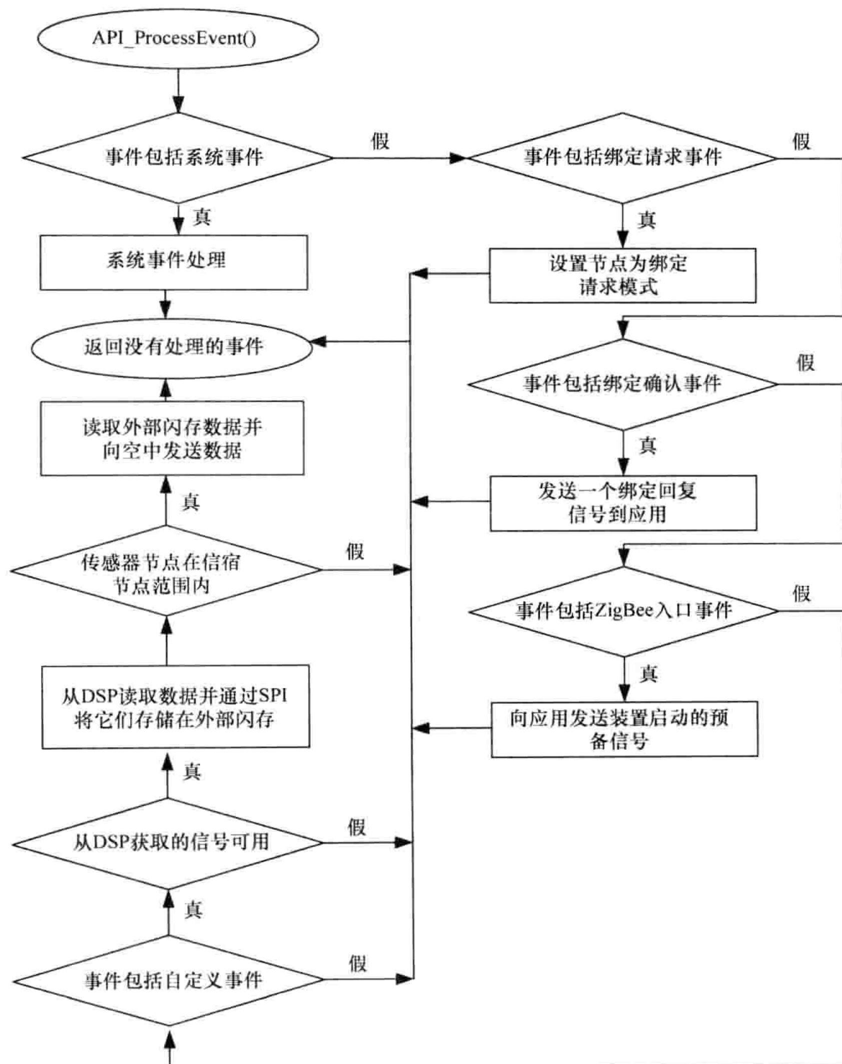


图 7.7 传感器节点的任务事件处理器的事件处理流程

7.4 测试结果

7.4.1 设备安装

用在实验室定标及现场试验 I 中的微电子机械系统（MEMS）惯性传感器是美国仿真器件公司的三轴 ±3g 加速器 ADXL335 和 ST 微电子公司的单轴偏航率为 ±300°/s 的陀螺仪。加速器和陀螺仪在 3.3V 电压下工作。加速器敏感度是 300mV/g，陀螺仪的是 3.3 mV/°/s。模拟惯性传感器的详细描述如表 7.3 所示。

表 7.3 ADXL335 和 LISY300AL 规格描述

参数	典型值
陀螺仪 LISY300AL	
测量范围	±300°/s
灵敏度	3.3mV/°/s
偏差	±2.4°/s
随机游走角速度	0.1°/s/ $\sqrt{Hz}$
加速器 ADXL335	
测量范围	±3.6g
灵敏度	300mV/g
零位偏移稳定度	±10.8mg
加速器随机游走在 X_{out}、Y_{out}	150μg/ $\sqrt{Hz}$RMS
加速器随机游走在 Z_{out}	300μg/ $\sqrt{Hz}$RMS

多信道模数转换器对来自加速器和陀螺仪的模拟信号进行采样，并处理惯性传感器测量的数据，而后将其转化为数字信号。利用美国仿真器件公司的 14bit、285KSPS 模数转换器（AD7856）对惯性传感器测量的数据进行采样。多路复用器在模数转换器的输入阶段用来多信道采样。因此，在两个顺序频道采样之间有时间时延（Δt）存在[15]。由于依靠的是模数转换器主时钟信号（最大为 6MHz），其转换时间会非常小，对于由相位时延而造成的误差无须考虑。在现场测试中采用的 GPS 接收器是来自 μ - blox 公司的 LEA - 5H。

现场试验 II 主要测试评估导航板的性能，测试于 2011 年 11 月 19 日在加拿大金斯顿，女皇大学主校区附近的地面车辆上进行，测试车辆在三条道路轨迹行驶。

测试中，GPS LEA - 5H 集成了导航板，惯性传感器 ADIS16003、ADIS16060 和 HMC6352 分别提供加速度、角速度及航向角。另一个 GPS μ - blox EVK - 5H 被用作参考以和导航板的定位功能进行比较，见表 7.4。

表 7.4　ADIS16003、ADIS16060 和 HMC6352 规格描述

参数	典型值
陀螺仪 ADIS16060	
测量范围	±300°/s
灵敏度	3.3mV/°/s
偏差	±2.4°/s
随机游走角速率	0.1°/s/ $\sqrt{Hz}$
加速器 ADIS16003	
测量范围	±1.7g
灵敏度	820LSB/g
零位偏移稳定度	±8.5mg
加速器随机游走在 X_{out}、Y_{out}	110μg/ $\sqrt{Hz}$RMS
磁传感器 HMC6352	
航向精度	2.5deg RMS
航向分辨率	0.5deg
干扰场	min 20 Gauss
曝光场	max 10 000 Gauss

利用 GPS EVK－5H 和 CC2430EM－SmartRF04EB 来接收从导航板传来的位置信息，这些设备由笔记本供电。其设备安装如图 7.8 所示。

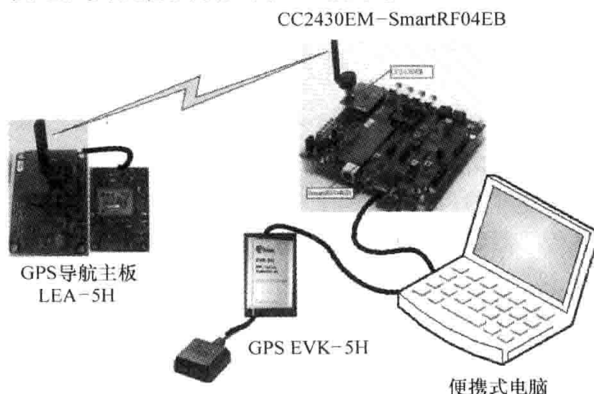


图 7.8　区域测试 II 的设备安装

7.4.2　实时性能分析

数字信号处理器的实时性能通过 CCS C55xx Rev 3.0 周期精确仿真器来评测。每条汇编指令由特定数目的指令周期来执行，每次机器计算和卡尔曼滤波（KM）计算的持续时间可通过计算程序执行所需的周期数来实现。

表 7.5　程序的执行时间

	CPU 工作周期次数	运行 100MHz 的 DSP 的执行时间/ms
初始化		<2
GPS 数据读取		90.909（每秒）

（续）

	CPU 工作周期次数	运行 100MHz 的 DSP 的执行时间/ms
INS 数据读取		4.65
机械化	84 709	0.8
KF	4 023 352	40

如表 7.5 所示，一次机器计算需要 84 709 个指令周期；一次卡尔曼滤波（KF）计算需要 4 023 352 个指令周期。当数字信号处理器以 100MHz 运行时，运行每个指令周期需要 10ns。因此每一步机器计算需要 0.8ms，而每次卡尔曼滤波（KF）则需 40ms。基于这些结果，GPS 和 INS 读取数据的时间可以通过运行原型导航板、记录时间及利用 CCS 仿真程序来计算这段时间内导航计算周期的次数来计算得出。惯性导航系统（INS）每次读取数据的时间平均大约是 4.65 ms，当 GPS 数据变化时，程序花费大约 90.909 ms 来读取并解析 GPS 数据。根据 7.3 节介绍的软件设计，导航计算运行在一个无限的循环中。每一步骤中，INS 传感器的读取，机械化及卡尔曼滤波计算将成功地执行。相比之下，GPS 数据读取运行在服务程序中断（ISR）。因此，如果 GPS 更新可用，数字信息处理器（DSP）在 100MHz 工作频率下每秒可运行导航计算 20 次并得到 20 次位置数据（包括速度和航向信息），而如果 GPS 没有变化，则每秒可以得到 22 次位置数据计算。

7.4.3 随机错误模拟

为了导出 MEMS 陀螺仪和加速度计的一阶噪声方差和相关时间，需要进行两小时的静态测试，从中收集数据来估算惯性传感器误差自相关序列。通过消除原始测量的偏移，双轴陀螺仪和加速度计的自相关序列即可得到计算（见图 7.9 ~ 图 7.11 和表 7.6）。这些参数用于对惯性传感器随机误差进行建模。

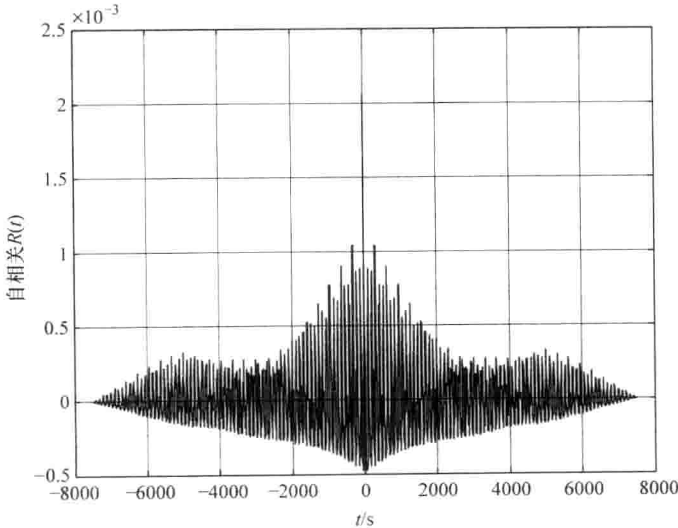


图 7.9　消除了偏置补偿后，两个小时固定数据集 x 轴加速度计读数的自相关（使用因子 1000 进行下采样）

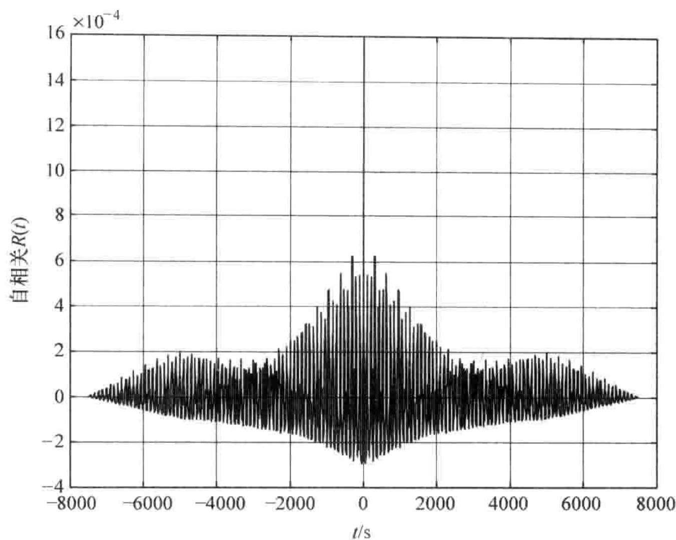


图 7.10　消除了偏置补偿后，两个小时固定数据集 y 轴加速度计读数的自相关（使用因子 1000 进行下采样）

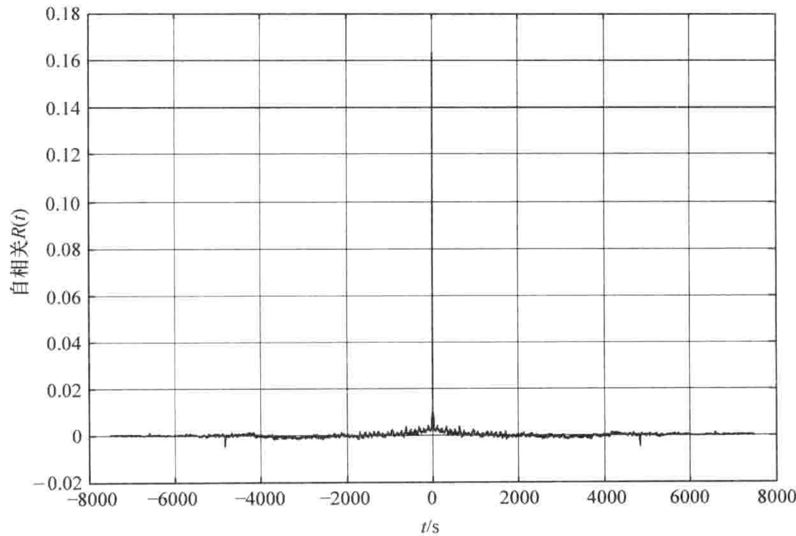


图 7.11　消除了偏置补偿后，两个小时固定数据集 z 轴加速度计读数的自相关（使用因子 1000 进行下采样）

表 7.6　在区域测试 I 中使用的第一顺序高斯马尔可夫链模型参数

	X 加速度计	Y 加速度计	Z 加速度计
噪声参数 σ^2	0.002 062 596	0.001 597 938	0.163 237 989
相关时间 τ/s	981.7	478	<100

7.4.4 开放现场测试

1. 现场测试 I

第一次测试中使用的导航系统由 ADXL335、LISY300AL、AD7856、GPS LEA－5H 和 DSP 评估模块 TMS320VC5505EVM 组成。惯性传感器安装在四轮车上，GPS 天线安装在车顶。通过 DSP 读取 INS 和 GPS 的数据进行数据采集。便携式电脑为整个原型板提供能量并记录 DSP 发来的数据。

此次现场测试于 2010 年 9 月 23 日，在安大略省金斯顿女皇大学主校区足球场赛道上进行。测试场地属于开放区域，且在整个测试期间，场地上方有多个导航卫星可供使用。试验期间的平均速度是 1.45m/s。由于地面平坦，惯性传感器振动幅度很小。整个测试持续了 41s，测试距离大约 400m。

此试验中，利用非完整性约束来提高 GPS/INS 松耦合集成系统的精度。从卡尔曼滤波器（KF）获得的带有和不带有非完整性约束的轨迹线描绘如图 7.12 所示。为了测试无 GSP 信号状态下导航方案的性能，沿着轨道线的不同位置设置四个 20s 无 GSP 信号中断的时间段来进行仿真。

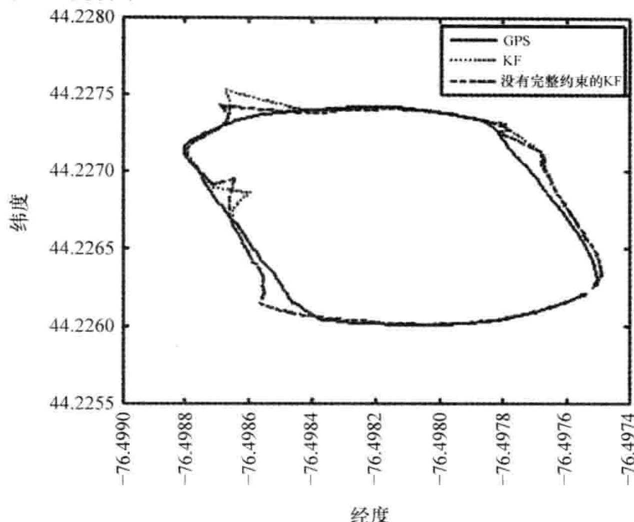


图 7.12 4 次 GPS 运行中断情况下 GPS 轨道与 KF 轨道的对比

此外，表 7.7 和表 7.8 分别给出了带有和不带有非完整性约束测试的位置/速度误差及其对比结果。由表中可以明显看出，在没有 GPS 信号中断期间，随着振动幅度的增大，误差也明显增大。

表 7.7 GPS 信号中断造成的定位和速度偏差

		第 1 次中断	第 2 次中断	第 3 次中断	第 4 次中断
北部定位偏差/m	平均值	8.25	1.89	3.96	11.56
	均方根值	9.83	2.23	5.58	14.28
	最大值	17.44	4.61	12.81	26.97

（续）

		第 1 次中断	第 2 次中断	第 3 次中断	第 4 次中断
东部定位偏差/m	平均值	1.81	3.92	6.82	1.23
	均方根值	2.23	5.03	9.12	1.76
	最大值	3.98	10.21	19.04	4.94
定位偏差/m	平均值	8.49	4.40	7.98	11.65
	均方根值	10.08	5.50	10.69	14.39
	最大值	17.89	11.21	22.95	27.42
北部速度偏差/m	平均值	0.78	0.32	0.70	1.37
	均方根值	0.83	0.38	0.85	1.44
	最大值	1.36	1.08	1.51	1.97
东部速度偏差/m	平均值	0.17	0.61	0.97	0.41
	均方根值	0.19	0.64	1.09	0.55
	最大值	0.30	0.93	1.67	1.11

表 7.8 由非完整约束的精度改进

		第 1 次中断	第 2 次中断	第 3 次中断	第 4 次中断
纬度偏差/m	平均值	0.053 11	−0.051 41	−2.739 88	−2.715 50
	均方根值	0.071 52	0.251 23	−4.272 84	−3.294 70
	最大值	0.163 83	0.378 41	−10.468 11	−6.414 86
经度偏差/m	平均值	0.063 45	−1.436 84	0.354 43	−0.026 30
	均方根值	0.084 62	−1.846 54	0.516 79	−0.082 13
	最大值	0.184 79	−3.637 89	1.292 97	−0.168 86
定位偏差/m	平均值	0.066 14	−1.319 06	−0.444 83	−2.684 00
	均方根值	0.088 71	−1.466 55	−0.967 12	−3.275 41
	最大值	0.201 41	−2.952 20	−2.477 91	−6.317 21
北部速度偏差/m	平均值	0.008 81	0.025 52	−0.481 60	−0.308 42
	均方根值	0.009 60	0.066 88	−0.557 73	−0.337 08
	最大值	0.014 26	0.095 83	−0.924 19	−0.529 40
东部速度偏差/m	平均值	0.008 20	−0.186 25	0.066 67	−0.002 13
	均方根值	0.009 23	−2.00 72	0.087 50	0.012 25
	最大值	0.015 36	−0.286 59	0.200 73	0.048 80

在 4 次 GPS 仿真信号缺失期间，集成结果和 GPS 输出值之间的位置差和速度数据差的统计结果如表 7.7 所示。位置数据误差的均方根值小于 14.5m，但其最大值高达 27.42m。在 4 个无 GPS 信号期间的速度误差均方要小于 1.44m/s。

为了评估精度的改进，表 7.8 列出了带非完整性约束和不带完整约束的卡尔曼滤波

器提供的位置/速度误差数据的差异。

表中的数据集显示，与不带有非完整性约束的KF算法相比，带有非完整性约束的KF算法对位置和速度的测试得到更精确的结果，尽管在某些情况下它们提供同等级别的精确度。试验的结果证实了在短期的GPS信号中断情况下非完整性约束能保证更好的性能。

2. 现场测试II

图7.13～图7.15分别描绘了从GPS EVK－5H和车载场景导航获得的三条轨迹线。沿着轨迹线的不同位置有几处GPS信号中断，平均中断时间是30s。表7.9列出了GPS中断期间导航板输出的位置和GPS输出的位置差异，每条轨迹线的所有GPS中断期间的平均位置误差也包括在其中。尽管由于使用低价的基于微电子机械系统的惯性传感器，导致在30s GPS信号中断期间内其位置误差超过20m，但该结果仍然表明该硬件系统在提供精确导航方案的可靠性。

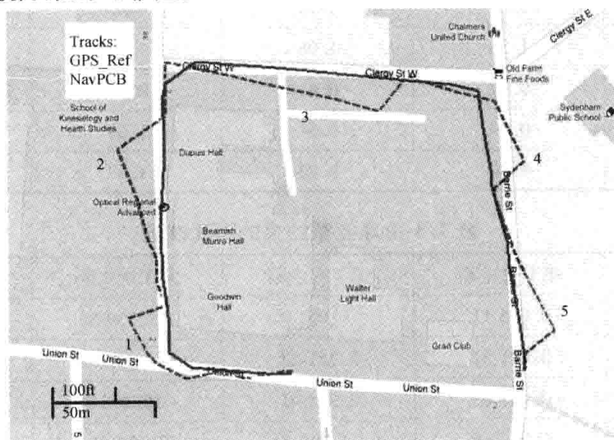


图7.13 区域测试II（A）：5次GPS运行中断情况下GPS轨道与车内轨道比较

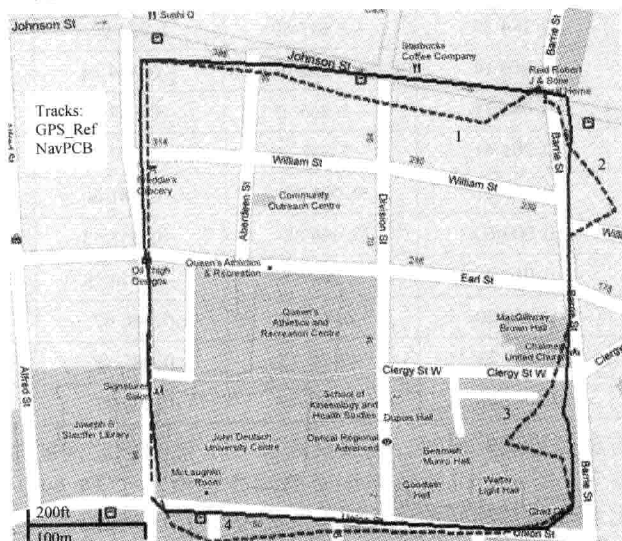


图7.14 区域测试II（B）：4次GPS运行中断情况下GPS轨道与车内轨道比较

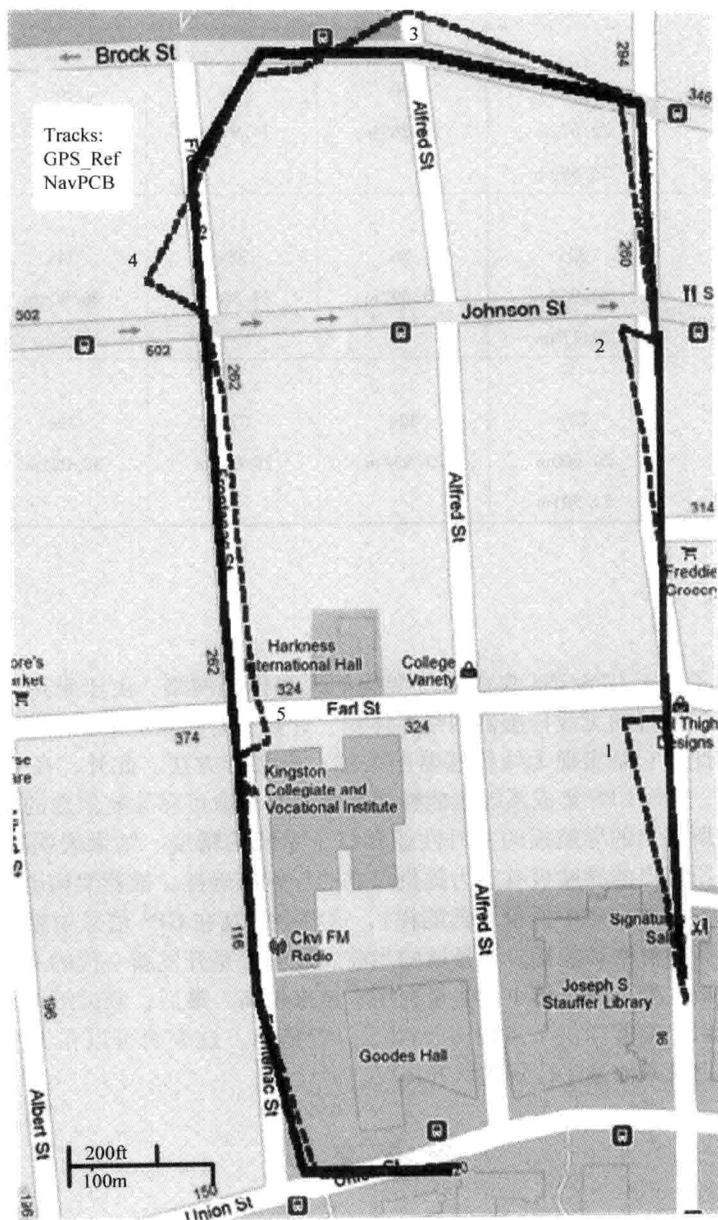


图7.15 区域测试II（C）：5次GPS运行中断情况下GPS轨道与车内轨道比较

表 7.9 现场测试Ⅱ：GPS 中断时的定位误差

	中断 1	中断 2	中断 3	中断 4	中断 5
轨迹 A					
中断时长	24s	28s	34s	36s	30s
定位误差	22. 672m	22. 289m	34. 939m	17. 453m	21. 127m
平均定位误差	23. 696m				
轨迹 B					
中断时长	32s	29s	35s	34s	
定位误差	30. 900m	25. 692m	33. 308m	26. 803m	
平均定位误差	29. 176m				
轨迹 C					
中断时长	29s	32s	32s	29s	33s
定位误差	24. 600m	21. 934m	29. 073m	32. 021m	28. 879m
平均定位误差	27. 301m				

7.5 结论

本章讲述了基于 GPS/INS 集成系统架构的无线传感网络，由于采用了该集成体系结构设计，基于位置的无线传感器网络在体积、计算实时性及能量利用效率方面都是高度优化的，因此，它是实现无线传感器网络的一种推荐方法。此外，在 GPS 信号微弱或中断情况下，INS/GPS 集成系统也能够使系统具有获取可靠导航信息的能力。通过现场测试来评估所提出的导航板的实时性能和整个系统的精度。结果表明在短期 GPS 信号中断期间，所提出的导航板有能力提供可靠的导航准确性。推荐架构也能够容纳更多的高级 INS 设备（非本章中低价和低能耗），这将会提高在 GPS 信号中断时系统的准确性，但需要更高的价格和能耗。该领域的当前发展趋势是开发新一代的 INS 设备，该设备在体积和质量上变得越来越小，能量利用率越来越高。最后，测试结果显示无线传感网络在实际应用中能够提供节点的 GPS/INS 位置信息，这表明可以在无线传感器网络中使用认知路由及其他基于位置的认知协议。

参考文献

1. Y.B. Ko and N.H. Vaidya, "Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks," *Wireless Networks* 6, no. 4, 2000, pp. 307–321.
2. M. Zorzi and R.R. Rao, "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance," *IEEE* Transactions on Mobile Computing 2, no. 4, 2003, pp. 337–348

3. V. Hnatyshin, "Design and Implementation of an OPNET model for simulating GeoAODV MANET routing protocol," in *Proceedings of the OPNETWORK 2010 International Conference*, Washington, D.C., 2010.
4. D. Dipankar and S.B.R. Nabendu Chaki, "LACBER: A new location aided routing protocol for GPS scarce MANET," *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)* 1, August 2009.
5. G. Zhang, "A low cost integrated INS/GPS system," *UCGE Report*, no. 20078, 1995.
6. G.H. Elkaim, M. Lizarraga, and L. Pederseny, "Comparison of low-cost GPS/INS sensors for Autonomous Vehicle applications," *IEEE/ION Conference*, 2008, pp. 1133–1144.
7. R.T. Kelley, I.N. Katz, and C.A. Bedoya, "Design, development and evaluation of an Ada coded INS/GPS open loop Kalman filter," in *Proceedings of the IEEE National, Aerospace and Electronics Conference*, 1990, pp. 382–388.
8. A. Chatfield, *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
9. R.M. Rogers, *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, 3rd ed. AIAA education series, Reston, Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
10. A. Noureldin, A. Osman, and N. El-Sheimy, "A neuro-wavelet method for multi-sensor system integration for vehicular navigation," *Measurement Science & Technology* 15, no. 2, 2004, pp. 404–412.
11. K.W. Chiang, A. Noureldin, and N. El-Sheimy, "A new weight updating method for INS/GPS integration architectures based on neural networks," *Measurement Science & Technology* 15, no. 10, 2004, pp. 2053–2061.
12. E.H. Shin, *Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications*, internal report, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, Report #20156, 2001.
13. J. Shang, G. Mao, and Q.T. Gu, "Design and implementation of MIMU/GPS integrated navigation systems," *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2002, pp. 99–105.
14. P.P. Qu, L. Fu, and X. Zhao, "Design of inertial navigation system based on micromechanical gyroscope and accelerometer," *CCDC 2009: 21st Chinese Control and Decision Conference, Vols. 1–6, Proceedings*, 2009, pp. 1351–1354.
15. V. Agarwal, H. Arya, and S. Bhaktavatsala, "Design and development of a real-time DSP and FPGA-based integrated GPS-INS system for compact and low power applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 45, no. 2, 2009, pp. 443–454.
16. ADS8364, *Texas Instruments, datasheet*. Available from: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ads8364.pdf.
17. ADIS16060, *Analog Devices Inc., datasheet*. Available from: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16060.pdf.
18. ADIS16003, *Analog Devices Inc., datasheet*. Available from: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16003.pdf.
19. LEA 5H, *u-blox, datasheet*. Available from: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-5x_DataSheet_%28GPS.G5-MS5-07026%29.pdf.
20. CC2430, *Texas Instruments, datasheet*. Available from: http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=cc2430&fileType=pdf.

21. *Z-Stack Developer's Guide*, Texas Instruments, Document Number: F8W-2006-0022.
22. *CC2430DK Development Kit User Manual*, Texas Instruments. Available from: http://focus.ti.com/lit/ug/swru133/swru133.pdf.
23. C. Tang, *A Hardware Architecture for GPS/INS-Enabled Wireless Sensor Networks*, MSc thesis, Queen's University, 2012.
24. F. Aalamifar, *Design and Hardware Implementation of a Cognitive Wireless Sensor Network: Application to Environment Monitoring*, MSc thesis, Queen's University, 2011.
25. F. Aalamifar, G. Vijay, P.A. Khozani, and M. Ibnkahla, "Cognitive wireless sensor networks for highway safety," *NSERC DIVA Workshop, ACM Proceedings*, Ottawa, September 2011.

附录　缩　略　语

缩写	英文全称	中文
AAC	adaptive admission control	自适应准入控制
ACA	admission control algorithm	准入控制算法
ACF	autocorrelation function	自相关函数
ACK	acknowledgment	确认
ACS	autocorrelation sequence	自相关序列
ADC	analog-to-digital converters	模拟/数字转换器
AF	application framework	应用框架
AI	artificial intelligence	人工智能
AM	adaptive modulation	自适应调制
AMI	adaptive modulation with idle mode	空闲模式下的自适应调制
ANN	artificial neural network	人工神经网络
AODV	ad hoc on-demand distance vector	特设按需距离矢量
APL	application layer	应用层
AS	adaptive sleep	自适应睡眠
ASAM	adaptive sleep with adaptive modulation	带自适应调制的自适应睡眠
AWGN	additive white Gaussian noise	加性高斯白噪声
BER	bit-error rate	误码率
BWRC	Berkeley Wireless Research Center	伯克利无线研究中心
CACP	contention-aware admission control protocol	具有竞争意识的准入控制协议
CB	connectivity based	基于连通的
CCAR	cognitive channel-aware routing	认知信道感知路由
CCMR	cost and collision minimizing routing	成本和碰撞最小化路由
CCS	code composer studio	代码编译集成环境
CDME	cognitive decision-making engine	认知决策引擎
CDP	cell density packet	单元密度包
CDR	cognitive diversity routing	认知多样性路由
CEP	circular error probable	圆概率误差
CME	change monitoring engine	变化监测引擎
CN	cognitive network	认知网络

（续）

缩写	英文全称	中文
CPLD	complex programmable logic device	复杂可编程逻辑器件
CPN	cognitive packet network	认知分组网络
CPU	central processing unit	中央处理单元
CS	carrier sensing	载波侦听
CSI	channel state information	信道状态信息
CR	cognitive radio	认知无线电
CSD	cyclic spectral density	循环谱密度
CSL	cognitive specification language	认知规范语言
CSMA	carrier-sense multiple access	载波侦听多址接入
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance	避免碰撞的载波侦听多址接入
CSN	cognitive sensor network	认知传感器网络
CTS	clear to send	清除发送
DARAM	dual-access random access memory	双存取的随机存取存储器
DE	data entity	数据实体
DGRAM	delay guaranteed routing and MAC	时延保证路由和 MAC
DPRAM	dual port random access memory	双端口随机存取存储器
DSA	dynamic spectrum access	动态频谱接入
DSDV	destination-sequence distance vector	目的序列距离矢量
DSN	destination sequence number	目的序列号
DSP	digital signal processing	数字信号处理
DSR	dynamic source routing	动态源路由
EDD	expected disconnection degree	预期断线度
EECCR	energy-efficient m-coverage andn-connectivity routing	高效节能的 M-覆盖率和 N-连接性的路由
EEHC	energy-efficient hierarchical cluster-based routing	高效节能的基于分层聚类的路由
EEMP	energy-efficient multihop polling	高效节能多跳轮询
ETX	expected transmission count	预期传输计数
FBR	flood-based routing	基于泛洪的路由
FC	fusion center	融合中心
FCC	Federal Communications Commission	美国联邦通信委员会
FND	first sensor node death, first node death	第一传感器节点失效，首个节点失效

（续）

缩写	英文全称	中文
FPGA	field-programmable gate array	现场可编程门阵列
FSM	finite state machine	有限状态机
GA	genetic algorithms	遗传算法
GAF	geographic adaptive fidelity	地理自适应保真度
GEAR	geographic and energy-aware routing	地理和能量感知路由
GeRaF	geographic random forwarding	地理随机转发
GM	Gaussian-Markov	高斯－马尔可夫
GPIO	general purpose input/output	通用输入/输出
GPRMC GPS	recommended minimum sentence	推荐的最低刑期最小判读
GPS	global positioning system	全球定位系统
GRISP	gateway relocation algorithm for improved safety and performance	提高了安全性和性能的网关搬迁算法
GSM	global system for mobile communication	全球移动通信系统
GVGrid	QoS routing for VANETs	VANET 的 QoS 路由
GVLL	generic virtual link layer	通用虚拟链路层
GyTAR	improved greedy traffic-aware routing	改进的贪婪的流量感知路由
HAL	hardware abstraction layer	硬件抽象层
I/O	input/output	输入/输出
IC	integrated circuit	集成电路
iCAC	interference-based fair call admission control	基于干扰的公平呼叫准入控制
IMU	inertial measurement unit	惯性测量单元
IQRouting	interference-aware QoS routing	干扰感知 QoS 路由
ISM	industrial, scientific, and medical	工业、科学和医疗
ISR	interrupt service routine	中断服务程序
IT	interference temperature	干扰温度
KB	knowledge base	知识库
KF	Kalman filter	卡尔曼滤波器
KP	knowledge plane	知识平面
LAN	local area network	局域网
LAR	location-aided routing	位置辅助路由
LBI	low battery input	低电压输入
LBO	low battery output	低电量输出
LEACH	low-energy adaptive clustering hierarchy	低能量自适应聚类分层

（续）

缩写	英文全称	中文
LET	link expiration time	链路过期时间
LOS	line of sight	视距
LPP	linear programming problem	线性规划问题
LURP	local update-based routing protocol	本地更新的路由协议
LUT	look up table	查找表
MAC	medium access control	媒体访问控制
MANET	mobile ad hoc network	移动专用网络
MCDMA	micro-programming controlled direct memory access	微编程控制的直接内存访问
MCU	micro controller unit	微控制器单元
ME	management entity	管理实体
MEMS	micro-electromechanical system	微机电系统
MHR MAC	header	集管
MIMO	multiple input multiple output	多输入多输出
MIMU	micro-miniature inertial measurement unit	微型惯性测量单元
MMSPEED	multipath multispeed protocol	多径多速路由协议
MURU	multihop routing for urban VANET	城市 VANET 多跳路由
NHC	nonholonomic constraints	非完整约束
NMEA	National Marine Electronics Association	国家海洋电子协会
NPN	negative-positive-negative	负—正—负
NWK	network layer	网络层
OFDMA	orthogonal frequency division multiple access	正交频分多址接入
OODA	observe, orient, decide, and act	观察、定向、决定和行动
OSAL	operating system abstraction layer	操作系统抽象层
PAN	percentage of alive nodes	存活节点的百分比
PAN	previous access network	前接入网络
PAP	power adaptation policy	功率自适应策略
PDF	probability density function	概率密度函数
PEGASIS	power-efficient gathering in sensor information system	功率效率收集传感器信息系统
PER	packet error rate	每包错误率
PHY	physical layer	物理层
PIC	programmable interface controller	可编程接口控制器
PLL	phase-locked loop	相位锁定回路

（续）

缩写	英文全称	中文
PLR	packet loss ratio	丢包率
PNF	probability of node failure	节点发生故障的概率
PSD	power spectral density	功率谱密度
PU	primary user	主要用户
PV	photovoltaic	光伏
QAM	quadrature amplitude modulation	正交幅度调制
QoS	quality of service	服务质量
QRDS QoS	routing and distributed scheduling	路由和分布式调度
RAC	routing and admission control	路由和准入控制
RF	radio frequency	无线电频率
RMS	root mean square	均方根
RNNRL	random neural networks with reinforcementl-earning	随机神经网络的强化学习
ROC	receiver operating characteristics	接收器工作特征
ROM	read-only memory	只读存储器
RRE	ratio of remaining energy	剩余能量比
RREC	route discovery message	路径发现消息
RREP	route reply	路径应答
RREQ	route request	路径请求
RRS	robust routing and scheduling	鲁棒性路由和调度
RSSI	received signal strength indicator	接收信号强度指示器
RTS	request to send	请求发送
SAN	software adaptable network layer	软件适应性网络层
SAP	service access point	服务接入点
SARAM	single-access random access memory	单存取随机存取存储器
SDR	software-defined radio	软件定义无线电
SGPR	stable group-path routing	稳定的组路径路由
SINR	signal-to-interference plus noise ratio	信号与干扰加噪声比
SINS	strap-down inertial navigation system	捷联式惯性导航系统
SNR	signal to noise ratio	信噪比
SP	smart packet	智能包
SPI	serial peripheral interface	串行外设接口
SPIN	sensor protocol for information via negotiation	通过谈判获得信息的传感器网络路由协议

（续）

缩写	英文全称	中文
SPTF	Spectrum Policy Task Force	无线电频谱政策任务组
SSP	security service provider	安全服务提供商
SSR	self-selective routing	自我选择性路由
STBC	space-time block coding	空时分组编码
STF	space-time-frequency	空间—时间—频率
TARA	topology-aware resource adaptation	拓扑感知的资源适应
TDMA	time division multiple access	时分多址
TM	traffic matrix	通信矩阵
UART	universal asynchronous receiver/transmitter	通用异步接收器/发送器
V2I	vehicle to infrastructure	车辆到基础设施
V2V	vehicle to vehicle	车辆到车辆
VANET	vehicular ad hoc network	车载专用网络
VLSI	very-large-scale integration	超大规模集成
VoIP	voice-over Internet protocol	互联网语音协议
WCETT	weighted cumulative expected transmission time	加权累计预期传输时间
WCM	weighted cognitive maps	加权认知图
WLAN	wireless local area network	无线局域网
WMN	wireless mesh network	无线网状网络
WSN	wireless sensor network	无线传感器网络
ZDO	ZigBee device object	ZigBee 设备对象

国际视野　科技前沿

国际信息工程先进技术译丛

《认知视角下的无线传感器网络》
《移动云计算：无线、移动及社交网络中分布式资源的开发利用》
《Android系统安全与攻防》
《内容分发网络》
《计算机网络仿真OPNET实用指南》
《移动无线信道》（原书第2版）
《LTE-Advanced：面向IMT-Advanced的3GPP解决方案》
《声学成像技术及工程应用》
《认知无线电通信与组网：原理与应用》
《LTE/SAE网络部署实用指南》
《网络性能分析原理与应用》
《云连接与嵌入式传感系统》
《IP地址管理原理与实践》
《自组织网络：GSM，UMTS和LTE的自规划、自优化和自愈合》
《实现吉比特传输的60GHz无线通信技术》
《LTE自组织网络（SON）：高效的网络管理自动化》
《UMTS中的LTE：向LTE-Advanced演进》（原书第2版）
《无线传感器及执行器网络》
《UMTS中的WCDMA－HSPA演进及LTE》（原书第5版）
《认知无线电网络》
《网络融合——服务、应用、传输和运营支撑》
《UMTS中的LTE:基于OFDMA和SC-FDMA的无线接入》
《高性能微处理器电路设计》
《吉规模集成电路互连工艺及设计》
《高级电子封装》（原书第2版）
《基于4G系统的移动服务技术》
《移动无线传感器网——技术、应用和发展方向》
《UMTS蜂窝系统的Q0S与Q0E管理》
《UMTS-HSDPA系统的TCP性能》
《基于射频工程的UMTS空中接口设计与网络运行》
《未来UMTS的体系结构与业务平台：全IP的3GCDMA网络》
《环境网络：支持下一代无线业务的多域协同网络》
《基于蜂窝系统的IMS—融合电信领域的V0IP演进》
《蜂窝网络高级规划与优化 2G/2.5G/3G/——向4G的演进》
《微电子技术原理、设计与应用》
《多电压CMOS电路设计》
《P2P系统及其应用》
《IPTV与网络视频：拓展广播电视的应用范围》
《下一代无线系统与网络》





CRC Press
Taylor & Francis Group

上架指导　工业技术／信息通信



ISBN 978-7-111-47637-5　定价：59.80元